

1 9 6 3

Nr 1 (16)

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

WARSZAWA — MIEDZESZYN

PRZEGLĄD ZAGADNIENI ŁĄCZNOŚCI

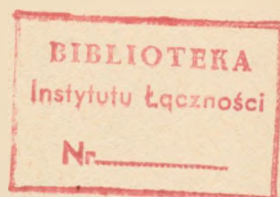


Wydawca: Instytut Łączności
Miejscowość: Warszawa



MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

PRZEGLĄD
ZAGADNIEŃ
ŁĄCZNOŚCI



ROK 3

WARSZAWA 1963

1/16/

INSTYTUT ŁĄCZNOŚCI

Ośrodek Informacji Techniczno-Ekonomicznej

Kolegium Redakcyjne:

Przewodniczący - mgr inż. Zenon Szpigler
Z-ca Przewodniczącego - mgr inż. Władysław Cetner

Członkowie:

inż. Edmund Janowski, doc. Stefan Jasiński,
mgr Kazimierz Kotowski, mgr inż. Adam Moniuszko,
mgr inż. Józef Możejko

Sekretarz Redakcji - Irena Kulko

Adres Redakcji:

Instytut Łączności

Ośrodek

Informacji Techniczno-Ekonomicznej
Warszawa-Miedzeszyn, ul. Szachowa 1

NA PRAWACH REKOPISU - DO UŻYTKU SŁUŻBOWEGO

Redaktor: J. Borkowska

Montaż tekstu: B. Drabik

Dział Wydawniczy OKW Instytutu Łączności
Format B5. Nakład 475. Druk ukończono
w czerwcu 1963 r.

PRZEGLĄD
ZAGADNIENÍ ŁĄCZNOŚCI

Nowoczesna radiokomunikacja mikrofalowa

SPIS TREŚCI

	Str.
1. Andrew G. Haley - Łączność kosmiczna w następnym pokoleniu - opracował J. Zygierewicz	1
2. J.H. Vogelmann - Komunikacja mikrofalowa - opracował R. Zienkiewicz	25
3. M. Morit - Najnowsze osiągnięcia techniki komunikacji mikrofalowej - opracował J. Derski	47

ŁĄCZNOŚĆ KOSMICZNA W NASTĘPNYM POKOLENIU^{1/}

Andrew G. Haley - Space communications of the next generation. Telecommunication Journal. Febr. 1962. Vol. 29, nr 2, s. 39-47

Referat wygłoszony na zebraniu, poświęconym Prawu Kosmicznemu i Socjologii, Amerykańskiego Stowarzyszenia Lotów Kosmicznych, Nowy Jork, 10 październik 1961 r.

1. WSTĘP

W następnym pokoleniu osiągnięcia nauki na polu rozwoju techniki łączności będą niewątpliwie wielokrotnie przewyższać wszystkie dotychczasowe zdobycze ludzkości w tej dziedzinie, obejmujące systemy łączności telegraficznej, telefonicznej i łączności radiowej, włączając w to również i telewizję. Szerokie perspektywy rozwoju techniki łączności są naprawdę czymś bardzo podnoszącym na duchu każdego z członków cywilizowanych społeczeństw.

Bardzo niekorzystnie przedstawia się natomiast sprawa rozwoju łączności z punktu widzenia socjologicznego i prawnego, zarówno w odniesieniu do naszej Ziemi, jak i innych planet, które mogą być zamieszkałe przez rodzaj ludzki. Właściwe zadania łączności nie mogą być spełnione na skutek rozbieżności interesów narodowych oraz dla-

^{1/} Na podstawie oryginału opracował J. Zygierewicz.

tego że wykorzystywanie zdobyczy łączności jest bardzo utrudnione przez istnienie barier językowych oraz różnic zwyczajowych poszczególnych narodów.

Praca niniejsza dotyczy zasadniczo problemów społecznych i prawnych, które obecnie stają przed ludzkością, jednak w celu zdania sobie właściwej z nich sprawy należy na wstępie podać w ogólnym zarysie przewidywane i możliwe do urzeczywistnienia osiągnięcia techniczne w dziedzinie łączności, które przedstawią we właściwym świetle ogrom kryzysu, jaki istnieje przed ludzkością na drodze podboju przestrzeni kosmicznej.

2. TRZY ETAPY

Ze względu na analogię możemy rozpatrywać etapy rozwoju komunikacji kosmicznej w oparciu o przebieg rozwoju komunikacji lotniczej.

W pierwszym etapie został wynaleziony samolot śmigłowy, wykorzystujący jako siłę napędową śmigło obracające się w powietrzu, podobnie jak to przy statkach czynią śruba lub koło łopatkowe obracające się w wodzie. Można przyjąć, że etap ten zakończył się wraz z wybudowaniem samolotu turbinowego.

Etap drugi może być określony jako era napędu odrzutowego. Śmigło i mało sprawne silniki napędzające zostały wyeliminowane. Siła napędowa jest uzyskiwana w tym przypadku w układzie termodynamicznym bezpośrednio przy wykorzystaniu atmosfery. Uzyskano olbrzymie oszczędności

jednocześnie na sprzęcie technicznym oraz na czasie trwania podróży.

W ten sposób doszliśmy do etapu trzeciego, ery pojazdów napędzanych rakietowo, które uwolniły człowieka od konieczności poruszania się tylko w ograniczonym obszarze atmosfery, umożliwiając komunikację w całym obszarze wszechświata. Rakiet jest tak dużo rodzajów i są one tak różnorodne, poczynając od rakiet napędzanych paliwem stałym do rakiet radiacyjnych, że nie ma tutaj miejsca nawet na wymienienie ważniejszych z nich.

Przenieśmy teraz te rozważania przez analogię na dziedzinę łączności. Nie będziemy rozpoczynać rozważań od pojazdów ciągniętych przez konie, lecz przejdziemy od razu do samolotów. Jedyne wyróżnienie można uczynić dla prymitywnego sposobu komunikowania się za pomocą sygnałów świetlnych, ponieważ jak się później przekonamy łączność za pomocą światła stanie się niewątpliwie jednym z najważniejszych systemów przyszłej łączności. Pierwszy etap możemy po prostu określić jako okres przewodowej łączności elektrycznej, który zaznaczył się epokowymi wynalazkami telegrafu i telefonu.

Drugim etapem jest okres łączności bezprzewodowej, w którym zakres fal radiowych jest wykorzystywany przez wszystkie służby telekomunikacyjne, jak telegrafię, telefonię, telewizję itd. Radio umożliwiło komunikowanie się ludzi za pomocą znaków, sygnałów głosowych lub przez przesyłanie obrazów na całej powierzchni kuli ziemskiej oraz w pewnym stopniu również we wnętrzu naszego układu słonecznego; należy wymienić chociażby odbicia sygnałów

radiowych od powierzchni Księżyca, Wenus i innych planet oraz przesyłanie z raket obrazów telewizyjnych odwrotnej strony Księżyca. Najbardziej hamujące postępowanie w dziedzinie radiofonii jest to, że nie można praktycznie zastosować wynalazków i że jest ograniczona szerokość dotychczas wykorzystywanego zakresu fal radiowych.

W ten sposób dochodzimy do trzeciego etapu rozwoju metod łączności, w którym natura objawia człowiekowi tak wiele różnych i nadających się do wykorzystania możliwości, że przechodzi to niemal granice ludzkiej wyobraźni i nie da się opisać nawet w sposób jak najbardziej ogólny.

Patrząc wstecz można jednak śmiało powiedzieć, że wynalazki i rozwój teorii łączności w ciągu każdego minionego roku były kolosalne i możemy być z nich naprawdę dumni.

3. BADANIA

W swym raporcie do Organizacji Narodów Zjednoczonych z roku 1960 profesor Auger stwierdził, że badania w dziedzinie telekomunikacji są obecnie przeprowadzane w oparciu o intensywne dociekania naukowe na polu fizyki, chemii metalurgii i matematyki. Wymienił on jako zagadnienia szczególnie warte dalszych studiów: badania fizycznych własności ciał stałych, opracowanie metod określania czystości różnych substancji przy wykorzystaniu analiz fizycznych i chemicznych, które pozwolą na dalsze rozszerzenie naszej wiedzy o zjawiskach zachodzących w podgrzewanych katodach, emisję światła na skutek

zjawisk rekombinacji, zjawisko kaskadowe, które jest szczególnie istotne przy badaniach nad emisją elektronów w półprzewodnikach, zjawisko fizyczne elektro-luminescencji i pośrednie poziomy energetyczne, które mogą przy tym występować /wykorzystując materiały do tego stosowane będzie również możliwe badanie zjawisk: foto-napięciowego, fotoopornościowego, fotopiezoelektrycznego i innych/, zjawiska fizyczne określające zasady działania wzmacniaczy parametrycznych^{1/}; takie materiały, jak pierwiastki metaliczne ziem rzadkich, teorie określające zasady pracy zarówno aktywnych, jak i pasywnych elektrycznych układów wielozaciskowych /filtry, korektory itp./ we wszystkich pasmach częstotliwości sposoby optymalnego kodowania sygnałów oraz wydzielanie pożądanego sygnału spośród wielkiej liczby innych. W roku 1961 stwierdzimy niewątpliwie, że nasze przewidywania z roku 1960 są spełnione z nadwyżką, gdyż obecnie naukowcy wyraźnie wyprzedzają założony plan.

Ze względu na ograniczony zakres wykorzystywanych fal radiowych już obecnie daje się wyraźnie zauważyć całko-

^{1/} Nazwa wzmacniacz parametryczny pochodzi stąd, że działanie takiego wzmacniacza jest oparte na wykorzystaniu zmian w czasie parametrów jednej lub większej liczby oporności urojonych. Działanie wzmacniacza jest warunkowane tym, że w pewnym zakresie zmienna w czasie oporność urojona posiada ujemną charakterystykę oporności. Zaletą takiego wzmacniacza są małe szumy własne oraz szerokie pasmo wzmocnienia; na przykład przy wzmocnieniu 20 dB w pasmie około 5 MHz uzyskuje się współczynnik szumów rzędu kilku decybeli /przyp. opracow./.

wite "nasylenie" poszczególnych pasm tego zakresu. Jako przykład obecnego wykorzystania fal radiowych można wymienić, że w USA pracuje w samych służbach specjalnych oraz służbach bezpieczeństwa ponad 2,5 miliona nadajników radiowych. Liczba ta nie obejmuje stacji rozgłaszania radiowego oraz rozmaitego rodzaju systemów łączności radiowej dla celów administracyjnych i wojskowych. Nowe metody techniczne, jak na przykład nadawanie jednowstęgowe, złagodziły nieco te trudności, lecz nasze coraz bardziej rosnące zapotrzebowanie na wykorzystywanie będącego do dyspozycji zakresu fal radiowych niewątpliwie przewyższy postęp w dziedzinie opracowań systemów i układów, pozwalających na zmniejszenie szerokości potrzebnych pasm częstotliwości oraz na wspólne użytkowanie tych samych częstotliwości.

4. NOWE METODY TECHNICZNE

Trzeci etap charakteryzuje się przede wszystkim odejściem od obecnie wykorzystywanych częstotliwości radiowych. Popularnym przykładem ilustrującym to jest wykorzystywanie jako środka przenoszenia informacji koherentnego^{1/} promieniowania świetlnego. Ta nowa technika

^{1/} Przy promieniowaniu niekoherentnym /cieplnym, świetlnym itp./ każda cząsteczka i atom danej substancji promieniają niezależnie, w różnych kierunkach, na różnych częstotliwościach, z przypadkową fazą i polaryzacją. Bardziej doskonałe jest promieniowanie monochromatyczne, które posiada wszystkie wady promieniowania niekoherentnego z wyjątkiem tej zalety, że wszystkie składowe pro-

znajdująca się w początkowym stadium rozwoju została już przebadana eksperymentalnie i fale świetlne będą niewątpliwie coraz szerzej wykorzystywane. Wykorzystując fale świetlne można przenieść wielokrotnie większą liczbę informacji niż to było dotychczas możliwe przy użytkowaniu ograniczonego zakresu fal radiowych. Przy wykorzystaniu koherentnego promieniowania świetlnego liczba linii łączności pracujących w tym zakresie częstotliwości będzie mogła przewyższać 10.000 razy liczbę linii pracujących przy uwzględnieniu tylko zakresu fal radiowych.

Możliwość realizacji nowych linii łączności o bardzo dużych pojemnościach posiada szczególnie duże znaczenie dla rozwoju łączności kosmicznej. Na konferencji w Genewie w roku 1959 można było na przykład zabezpieczyć do wykorzystania do celów łączności kosmicznej pasma radiowe o ogólnej szerokości zaledwie rzędu 130 MHz, przy uwzględnieniu całego dostępnego zakresu fal radiowych o częstotliwościach od 10 MHz do 10.000 MHz. Było ono przeznaczone wyłącznie do celów badań kosmicznych; a cała sprawa wyznaczenia odpowiednich pasm dla wykorzystania operacyjnego /łączność, rozgłaszanie, prowadzenie, sterowanie, przesyłanie danych, nawigacja itd./ była odłożona do roku 1963 i przypuszcza się, że konferencja po-

mieniowania mają tę samą lub prawie tę samą częstotliwość. W przypadku promieniowania koherentnego wszystkie składowe mają ten sam kierunek promieniowania, tę samą częstotliwość, fazę i polaryzację. Istniejące źródła naturalne promieniowania takiego nie wysyłają, uzyskanie strumienia koherentnego promieniowania stało się możliwe dopiero po wynalezieniu maserów i laserów /przyp. opracow./.

święcona temu zagadnieniu odbędzie się pod koniec roku 1963. Za pośrednictwem Komisji Studiów CCIR usiłujemy obecnie "dopasować" nasze wymagania na pasma częstotliwości do celów łączności kosmicznej do istniejących przydziałów dla służb łączności na powierzchni ziemi, tak aby zgłosić na konferencję gotowe propozycje zaleceń. Praca ta jest jednym z najpoważniejszych zadań, które stają obecnie przed CCIR i UIT.

Nie możemy zrezygnować całkowicie z wykorzystania zakresu fal radiowych jako bazy rozwoju łączności kosmicznej w następnym pokoleniu. Za dużo przeprowadzono badań i włożono pracy w obecnie istniejące i proponowane systemy łączności kosmicznej i za dużo urządzeń zostało wykonanych w oparciu o możliwości wykorzystania do celów łączności fal radiowych, aby można było nawet przypuszczać takie całkowite przejście na zupełnie nowy zakres częstotliwości i związaną z tym nową technikę łączności. Aby uwolnić się jednak od zagęszczenia i innych niedogodności fal radiowych, będziemy niewątpliwie coraz szerzej korzystać ze zdobyczy tej nowej techniki i dlatego też należy zapoznać się z podstawowymi pojęciami koherentnego promieniowania świetlnego, zasadami pracy maserów i laserów, zasadami łączności za pomocą promieni gamma oraz innymi zdobyczami naukowymi.

5. KONFERENCJA OKRĄGŁEGO STOŁU W SPRAWIE PRZESTRZENI KOSMICZNEJ

W czasie konferencji poświęconej sprawie przestrzeni kosmicznej, odbytej podczas XII Międzynarodowego Kongre-

su Astronautycznego rozważano możliwości łączności przy wykorzystaniu nowej techniki. W chwili obecnej te nowe zdobycze techniki mogą być wykorzystywane tylko eksperymentalnie. Lecz i tak posiadane wiadomości są już dostateczne aby przewidywać szybki rozwój i powszechne zastosowanie tych zdobyczy.

Dr Rehtin, przewodniczący konferencji określił te tendencje zdaniem:

"W obecnym czasie i przy wykorzystaniu obecnej techniki konwencjonalna łączność radiowa w zakresie częstotliwości od 20 MHz do 20 GHz jest wystarczająca dla sprawnego działania systemów łączności wewnątrz naszego układu słonecznego. Zadaniem konferencji jest przedyskutowanie możliwych do urzeczywistnienia systemów łączności pracujących poza konwencjonalnym zakresem częstotliwości radiowych".

Członkowie konferencji poświęcili szczególną uwagę trzem zasadniczym systemom łączności kosmicznej, pracującym poza zakresem częstotliwości radiowych. Dr Smith i dr Gordon rozważali sprawę wykorzystania fal świetlnych do celów łączności i radaru. Wykorzystanie to jest ściśle uzależnione od postępów w budowie maserów i laserów oraz innych urządzeń. Mr J.W. Ogland omówił możliwości wykorzystania fal ultrafioletowych. Mówił on o obecnym stanie prac nad generacją tego typu fal oraz o szerokim zakresie częstotliwości dostępnym do celów łączności przy ich użytkowaniu. Dr Herkens rozważał możliwość łączności w pozbawionej atmosferze przestrzeni kosmicznej za pomocą promieni gamma, wysyłanych przez

reaktory atomowe pracujące jako silniki napędowe pojazdów kosmicznych.

6. WYKORZYSTANIE FAL ŚWIETLNYCH

Dr Smith omówił zasady działania systemów łączności i radiolokacji pracujących z wykorzystaniem laserów i innych układów dla fal świetlnych. Dokładne zasady użytkowania tego rodzaju systemów nie mogą być w chwili obecnej określone, ponieważ wiele jest jeszcze spraw nieznanych, dotyczących zwłaszcza metod modulacji i odbioru. Można jednak już dzisiaj dokonać przybliżonych obliczeń w odniesieniu na przykład do szerokości pasm, które mogą być użytkowane.

Laser został opracowany po raz pierwszy w 1958 roku w laboratorium firmy Bell, przy udziale innych zainteresowanych firm. Nazwa laser pochodzi od pierwszych liter zdania określającego zasadę pracy tego wzmacniacza "light amplification by stimulated emission of radiation" /wzmacnianie światła przez wymuszoną emisję promieniowania/. Układ wytwarza koherentny strumień świetlny o dużej gęstości energii, co pozwala na wykorzystanie go w radarowych systemach optycznych oraz pozwala na modulację częstotliwości przy przesyłaniu informacji.

6.1. Lasery i masery

Należy określić różnice w technice budowy laserów i maserów oraz ująć w jedną całość zasady pracy i możliwości wykorzystania każdego z nich. Można powiedzieć, że

maser pełni te same funkcje w odniesieniu do sygnałów mikrofalowych, jakie pełni laser w stosunku do promieniowania świetlnego, a mianowicie skupia i zwiększa gęstość energii promieniowania, wytwarzając w ten sposób silne oscylacje. Generator maserowy przetwarza wewnętrzną energię molekularną w energię mikrofalową poprzez oddziaływanie promieniowania elektromagnetycznego bezpośrednio na elektrony związane w układach atomowych materiałów czynnych. Powstająca energia ma postać promieniowania elektromagnetycznego o długościach fal odpowiadających zakresowi mikrofalowemu. Natomiast energia promieniowana przez układ lasera ma postać fali elektromagnetycznej o częstotliwościach odpowiadających falam świetlnym.

W układzie generacyjnym lasera odpowiedni materiał czynny /ciało stałe, płynne lub gazowe/ jest umieszczony między dwoma równoległymi zwierciadłami i poddany działaniu promieniowania świetlnego z niezależnego źródła, zwanego "pompującym". Energia pompująca pobudza atomy materiału czynnego, powodując promieniowanie przez nie światła o innej długości fali, które ulega wielokrotnemu odbiciu między dwoma wymienionymi lustrami. Występujące w trakcie tego dalsze pobudzenie materiału powoduje znaczne zwiększenie gęstości strumienia świetlnego, tak że na wyjściu układu otrzymuje się bardzo wąski strumień światła o dużym natężeniu.

Właściwości lasera czynią go szczególnie odpowiednim do zastosowania w układach nawigacyjnych pojazdu kosmicznego. W systemach radiolokacyjnych pracujących

na falach świetlnych uzyskuje się bardzo dużą dokładność namiaru. Ocenia się, że błąd pomiaru odległości nie przekraczałby jednej mili przy dwóch pojazdach kosmicznych oddalonych od siebie o 100 tysięcy mil, ponadto wystarczający jest bardzo słaby sygnał odbierany. W porównaniu do systemów radiolokacyjnych, pracujących na falach radiowych, systemy na falach świetlnych posiadają cały szereg innych jeszcze zalet, na przykład dokładność pomiaru prędkości jest w przypadku radaru optycznego znacznie większa. Pozycja bardzo małego obiektu może być ustalona drogą automatycznego przeszukiwania za pomocą wiązki promieniowania wielkiego obszaru przestrzeni kosmicznej.

6.2. Zalety techniczne

W czasie trwania konferencji dr Smith mówił o tym, że w przeszłości łączność na falach świetlnych była bardzo utrudniona przez małe natężenie promieniowania dostępnych źródeł niekoherentnego światła, którymi były ciała czarne o temperaturach ograniczonych do kilku tysięcy stopni Kelwina. Laser, jako generator koherentnego promieniowania świetlnego, dał polepszenie jasności o sześć rzędów wielkości i umożliwił realizację łączności międzyplanetarnej, a być może i międzygwiazdowej. Koherentne promieniowanie lasera może być skupiane w bardzo wąski strumień świetlny, który pozwala na osiągnięcie przy średnich mocach nadawania bardzo dużych zasięgów. Ponieważ otrzymywane światło jest monochromatyczne,

łatwo daje się wyróżnić od promieniowania świetlnego Słońca lub gwiazd za pomocą odpowiednich filtrów.

W zasadzie możliwe jest modulowanie powyższego strumienia świetlnego za pomocą sygnałów mikrofalowych, które pozwala na uzyskanie bardzo dużej pojemności systemów łączności. Potrzebne jest jednak w tym celu zastosowanie zupełnie nowych metod modulacji i detekcji, które są obecnie w stadium opracowywania. W pierwszych przeprowadzonych próbach przy zastosowaniu laserów z rubinem uzyskano zasięg łączności około 7 mil przy pełnym świetle dziennym, a w nocy 15 do 25 mil.

Uwzględniając ograniczenie na skutek dyfrakcji oraz zjawiska szumów śrutowych pojemność jednokierunkowych systemów łączności jest teoretycznie proporcjonalna do częstotliwości pracy linii łączności. W przypadku fal świetlnych bardzo małe szerokości wiązki świetlnej utrudniają szybkie nawiązanie pewnej łączności. Tak więc ogólna pojemność systemu łączności jest tu praktycznie odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości pracy, kwadratu odległości i kwadratu szerokości wiązki promieniowanej anteny.

Ścisłe stosowanie się do powyższych założeń spowodowałoby, że w przypadku jednokierunkowej łączności Mars-Ziemia przypuszczalna szerokość użytecznego pasma systemu łączności na falach świetlnych wynosiłaby tylko 8 kHz. Dr C.H. Townes sugeruje jednak bardziej optymistyczne założenia, które pozwalają przewidywać łączną szerokość pasma 10^8 kHz. Strumień światła stosowany w takim systemie łączności byłby widoczny gołym okiem: z

odległości jednej dziesiątej roku świetlnego i wykrywane układowi detekcyjnymi z odległości kilkudziesięciu lat świetlnych.

6.3. Doświadczenia na wyższych harmonicznych

Ponieważ zalety lasera w obecnym stanie jego rozwoju są jeszcze bardzo ograniczone, należy dążyć do wprowadzenia układów zastępczych dla transmisji konwencjonalnych sygnałów dźwiękowych drogą zapisu lub inną metodą rozkładu na składowe. Z tego też względu fizycy Uniwersytetu w Michigan uzyskali po raz pierwszy wyższą harmoniczną strumienia świetlnego. Strumień świetlny o dużej intensywności, otrzymany z lasera i odpowiadający linii czerwonej widma, został skierowany na kryształ kwarcu. Na wyjściu układu otrzymano strumień świetlny odpowiadający dolnej linii niebieskiego widma, czyli drugą harmoniczną padającego światła. Zasadniczą zaletą tego doświadczenia jest to, że może ono otworzyć drogę dla szerszego zastosowania fal świetlnych dla celów łączności. Ponadto doświadczenie to pozwoliło na poznanie zupełnie nowych własności materiałów, np. nieliniowych własności optycznych niektórych ciał.

W USA stworzono próbny układ łączności umożliwiający transmisję rozmów w sposób tajny i cichy. Układ składa się z urządzenia: nadawczego i odbiorczego, ukształtowanych w sposób podobny do pistoletów. Oba współpracujące urządzenia zostają skierowane na siebie i transmisja odbywa się za pomocą wąskiego strumienia fal podczerwo-

nych, Słowa wypowiedane do mikrofonu modulują fale podczerwone, a odbiornik detekuje odbierany sygnał. System powyższy ma zasięg łączności około 20 mil. Dalsze ulepszenie urządzeń oraz przystosowanie ich do wykorzystania laserów pozwoli być może na zastosowanie tego systemu i w łączności kosmicznej.

7. FALE ULTRAFIOLETOWE

Mr Ogland rozważał możliwości rozwoju systemów łączności kosmicznej pracujących w zakresie fal ultrafioletowych. Duże odległości przy łączności kosmicznej wymagają stosowania anten o dużym zysku i małym poziomie szumów. Założenia te są najlepiej spełniane przy wykorzystaniu fal świetlnych. Spośród nich zakres fal ultrafioletowych odznacza się najmniejszym poziomem szumów. Dla uzyskania wąskiego strumienia niekoherentnego światła należy wytwarzać w małym punkcie bardzo dużą moc. Najlepiej daje się to zrealizować przez pobudzenie warstwy fosforu strumieniem elektronów o dużym napięciu. W urządzeniach eksperymentalnych uzyskano gęstość mocy promieniowania kilka razy większą niż na powierzchni Słońca. Strumień o mocy 1 W wystarcza na zapewnienie zasięgu prawie 50 milionów mil przy użytecznym pasmie 10 Hz, stosunku sygnału do szumów 10 oraz zysku anteny 77 dB. Przy krótszych zasięgach może być oczywiście przesyłane szersze pasmo informacji /np. wizyjnych/ przy zachowaniu tej samej mocy nadawania. Należy się spodziewać, że przy ulepszeniu układów da się uzyskać moc nadawania co najmniej dziesięć razy większą.

7.1. Pewność działania systemu łączności i moc zasilania

Rozwój techniki budowy i wystrzeliwania na duże odległości pojazdów kosmicznych wymaga stosowania środków łączności o dużej pewności pracy i minimalnym zużyciu mocy. Przy łączności w przestrzeni kosmicznej nie występują zjawiska pochłaniania, odbicia lub rozproszenia. Głównymi czynnikami określającymi maksymalny zasięg systemu łączności przy danej mocy nadajnika są zysk anteny oraz poziom szumów odbiornika. Przy określonych wymiarach zysk jej rośnie ze zwiększaniem częstotliwości pracy systemu. Fale świetlne pozwalają na uzyskanie bardzo dużych zysków anten i bardzo wąskich wiązek promieniowania. Fale podczerwone byłyby również dostatecznie krótkie z tego względu, ale brak dla ich wytwarzania odpowiednich źródeł punktowych o dostatecznie dużej gęstości mocy. Ze względu na szумы bardziej korzystnie przedstawiają się fale krótsze od podczerwonych, zwłaszcza fale ultrafioletowe. Wszystkie planety i inne ciała niebieskie mają temperaturę dostatecznie wysoką, aby wytwarzać szумы o częstotliwościach odpowiadających zakresowi fal podczerwonych, ale nie tak wysoką aby wytwarzać szумы w zakresie fal ultrafioletowych i dlatego główny wpływ będą miały tu szумы od efektu őrutowego. Największym źródłem szumów w ogóle jest ponadto sama powierzchnia Ziemi ze względu na jej bliskość od anteny odbiorczej. Słońce promieniuje szумы nie tylko w zakresie fal ultrafioletowych ale również w pozostałym sze-

rokiem zakresie fal elektromagnetycznych, włączając w to fale radiowe. Tak więc każdy odbiór zostanie zaszumiony, jeśli Słońce znajdzie się w wiązce anteny odbiorczej. W przypadku fal świetlnych łatwiej takiego przypadku uniknąć niż przy falach dłuższych ze względu na węższą wiązkę kierunkową anteny.

W USA prowadzono doświadczenia z łącznością na falach ultrafioletowych, pozwalającą na przenoszenie wąskich pasm informacji na odległości aż do 20 milionów mil. Dla uzyskania takiego zasięgu wystarcza moc promieniowania 1 W, a moc zasilania nie przekracza kilku watów. Dla uzyskania tego samego zasięgu na częstotliwościach radiowych moc promieniowania musiałaby być 100 razy większa.

Mimo wielu zalet fale ultrafioletowe mogą być wykorzystywane tylko do łączności między obiektami w przestrzeni kosmicznej, ponieważ łączność z powierzchnią Ziemi jest niemożliwa na skutek silnego pochłaniania tych fal przez atmosferę ziemską.

7.2. Zalety systemu łączności na falach ultrafioletowych

Podany powyżej system łączności na falach ultrafioletowych pracuje z wykorzystaniem źródła punktowego dającego wąski strumień promieniowania, pozwalający się łatwo modulować w amplitudzie. Źródło to składa się z lampy oscylograficznej z ekranem pokrytym warstwą fosforową, która pod wpływem pobudzenia strumieniem elektronów wysyła promieniowanie ultrafioletowe.

Zakres fal ultrafioletowych dostarcza pasmo częstotliwości milion razy szersze niż pasmo radiowe. Ponadto w porównaniu do częstotliwości radiowych potrzebne są znacznie mniejsze moce nadawania oraz mniejsze wymiary anten. Znaczenie tych czynników przy konstruowaniu pokładowych urządzeń pojazdów kosmicznych nie wymaga komentarzy.

Łączność na falach ultrafioletowych zapewnia całkowitą tajność informacji oraz jest w dużym stopniu zabezpieczona od zakłóceń zewnętrznych. W roku 1960 w USA zademonstrowano doświadczalny system łączności na falach ultrafioletowych, w trakcie czego były przesyłane na krótkie odległości sygnały rozmówne i telewizyjne. Stosowano modulację amplitudy przez zmianę natężenia strumienia elektronów w lampie.

Zastosowanie niekoherentnego promieniowania przy mocy rzędu 1 W pozwoliłoby przy modulacji szerokopasmowej rozszerzyć zasięg łączności do milionów mil. Takie zasięgi uzyskanoby przez skupienie promieniowania w wiązkę kierunkową o szerokości $2'$, co odpowiada zyskowi anteny około 77 dB. Pilną sprawą jest opracowanie źródeł punktowych o dostatecznie dużej gęstości mocy oraz wynalezienie odpowiednich detektorów.

8. PROMIENIE GAMMA

Dr Erkens przedstawił na konferencji propozycję wykorzystania do łączności kosmicznej promieni gamma z reaktorów pojazdów kosmicznych. Stosowane w przyszłości jako silniki napędowe reaktory atomowe będą wytwarzały

promienie gamma jako produkt uboczny. Omówiono metody modulacji strumienia takich promieni oraz stwierdzono, że łączność taka jest możliwa tylko między obiektami w przestrzeni kosmicznej, ponieważ promienie gamma są silnie rozproszone i tłumione w atmosferze ziemskiej, wskutek czego nie mogą być odbierane przez stacje naziemne.

System łączności za pomocą promieni gamma pozwala na wykorzystanie tego, co było dotychczas uważane za szkodliwy produkt rozpadu w reaktorze atomowym. Podczas gdy pokolenie wykorzystujące łączność na falach radiowych potrzebowało konstruować specjalne źródła mocy nadawania, źródła promieniowania gamma będą dostępne w przyszłości bez dodatkowych nakładów inwestycyjnych.

Dr Eerkens omówił także metody przenoszenia informacji za pomocą promieni gamma. Doniósł on, że przerywacz umieszczony przed obrotową tarczą z równomiernie na niej wyciętymi otworami pozwalał na modulację promieni gamma przez zmianę szybkości obrotu tarczy.

Podane obliczenia pozwoliły na stwierdzenie, że rozmowa niskiej jakości mogłaby być przekazywana przy wykorzystaniu typowych urządzeń reaktora przemysłowego na odległość około 48 mil. Przy optymalizacji wszystkich parametrów systemu należy spodziewać się powiększenia zasięgu 10 - a nawet 100-krotnie. Dr Eerkens utrzymywał, że przy tych samych założeniach sygnały kodowe mogłyby być przekazywane na odległość do 8.000 mil i że są możliwości rozszerzenia tego zasięgu do 800.000 mil.

9. UWAGI

Od czasu zakończenia konferencji dr H. Heffner z Uniwersytetu Stanford miał możliwość przeanalizować bliżej wygłoszone referaty i przedstawić swoje poglądy. Dają się one wyrazić w sposób następujący:

Zagadnienia poruszane na konferencji dotyczyły głównie sprawy wyboru najbardziej właściwej dla łączności kosmicznej częstotliwości pracy systemów. Odpowiedź na to pytanie jest uzależniona od naszych możliwości budowy nadajników i modulatorów, od właściwości środowiska propagacji /absorbcji i charakteru wnoszonych przez niego szumów/ i od zdolności wykonania dostatecznie czułych odbiorników. Z wyjątkiem zakresu fal radiowych nasza wiedza w tych dziedzinach jest tak mała, a równocześnie tempo postępu tak duże, że nie ma większego sensu w chwili obecnej analizować szczegółowo te zagadnienia.

Podstawową kwestią wszelkich rozważań jest przesyłanie informacji. Zanim będzie mógł być dokonany wybór optymalnej częstotliwości, potrzebna jest teoria łączności, która byłaby słuszna również dla fal świetlnych. Uzyskanie szerokiego pasma niekoniecznie oznacza powiększenie pojemności systemów, jeżeli będziemy musieli wziąć pod uwagę efekt kwantowy. Potrzebujemy pilnie kwantowej teorii łączności. Pierwsze kroki w tym kierunku zostały już zrobione i okazało się, że kwant małej częstotliwości pozwala na przeniesienie większej liczby informacji niż kwant większej częstotliwości. Jeżeli tak jest naprawdę, to będzie to miało duży wpływ na wybór częstotliwości pracy systemów.

Można wykazać na przykład, że najbardziej czuły detektor fazy potrzebuje przynajmniej jednego fotonu na określony przeciąg czasu /zależny od szerokości pasma/ dla samego wyrównania nieuniknionego szumu kwantowego. Ponieważ zaś fotonowi o większej częstotliwości odpowiada większa energia, zatem większa moc musi być odbierana przez układ detektora, jeżeli wzrasta częstotliwość systemu. Można skompensować tę stratę mocy dzięki wzrostowi zysku anteny ze zwiększaniem częstotliwości, ale wówczas wzrastają również trudności w nawiązaniu łączności między ruchomymi stacjami na skutek bardzo wąskich wiązek kierunkowych anten.

Zdaniem dra Heffnera bardzo wąskie wiązki promieniowania anten znacznie zmniejszają wartość użytkową systemu radarowego omawianego przez dra Smitha. Taki system byłby z pewnością niepraktyczny dla celów przeszukiwania przestrzeni, ponieważ przy małej szerokości wiązki, czas na to potrzebny byłby bardzo długi.

9.1. Inne systemy

Dr Heffner stwierdził, że nie jest nastawiony tak pesymistycznie jak inni w odniesieniu do sprawności laserów. Istnieją metody pompowania laserów za pomocą prądu stałego, które mogą pozwolić na uzyskanie dużej sprawności, takiej samej, jak uzyskiwana obecnie przy generatorach mikrofalowych. Dr Heffner podkreślił ten dziwny fakt, że jesteśmy obecnie zdolni generować na falach świetlnych moce rzędu kilowatów, podczas gdy musimy czynić wielkie wysiłki, aby uzyskać moc jednego wata na fali o długości jednego milimetra.

W odniesieniu do łączności na falach ultrafioletowych dr Heffner podkreśla, że brano pod uwagę tylko systemy łączności na falach ultrafioletowych, pracujące z wykorzystaniem promieniowania niekoherentnego. W przypadku takim może być stosowana wyłącznie modulacja amplitudy i nie ma zysku jak przy modulacji fazy, którą można by stosować przy promieniowaniu koherentnym. Możemy z dużym prawdopodobieństwem przewidywać niedługo wynalezienie takich źródeł nie tylko w zakresie fal ultrafioletowych, lecz również i podczerwonych.

Dr Eerkens stwierdził, że system łączności za pomocą niekoherentnych promieni gamma w przypadku pojazdów kosmicznych byłby mało kosztowny, ponieważ promienie gamma są ubocznym produktem reaktora atomowego. Takie rozumowanie, zdaniem dra Heffnera, może prowadzić do nieporozumienia, ponieważ wymiary i ciężar samego urządzenia modulującego mogą okazać się nieproporcjonalnie duże, a te parametry są najbardziej krytyczne przy urządzeniach pokładowych pojazdów kosmicznych.

9.2. Bariery dzielące ludzkość

Z punktu widzenia obecnych warunków cywilizacyjnych nie jest zbyt obiecująca perspektywa właściwego wykorzystania przez człowieka tych rewelacyjnych metod łączności. Po pierwsze na ziemi istnieje prawdziwa językowa wieża Babel, a zwyczaje narodowościowe działają jako siły przeciwstawne zjednoczeniu ludzkości. Są oczywiście pewne próby usunięcia tych rozbieżności jak na przykład wprowadzenie jednolitych znaków nawigacyjnych, opracowa-

nie metod automatycznego tłumaczenia z języka na język itp., ale nie mogą one przynieść rewelacyjnych wyników.

W czasie następnego pokolenia łączność z wykorzystaniem przestrzeni kosmicznej będzie niewątpliwie ograniczona jedynie do przesyłania sygnałów między określonymi tylko krajami. Tego samego zjawiska można się spodziewać w odniesieniu do pojazdów kosmicznych, z których każdy będzie posiadał załogę złożoną z przedstawicieli jedynie określonej narodowości. Nie ma żadnych technicznych przeszkód na drodze bezpośredniego retransmitowania wiadomości z każdego dowolnego punktu na powierzchni Ziemi do drugiego za pomocą sztucznych satelitów lub przekazywania tych wiadomości z obiektów w przestrzeni kosmicznej na powierzchnię Ziemi; istnieją tylko przeszkody natury politycznej i socjologicznej.

10. ŻYCIE NA INNYCH PLANETACH

W wygłoszonym na XII Międzynarodowym Kongresie Astronautycznym referacie przeanalizowano możliwości życia istot rozumnych na innych planetach. W oparciu o badania statystyczne dotyczące możliwości istnienia życia na innych planetach wysuwają się np. wnioski o wpływie kulistości planet na procesy ewolucji.

Fakt, że człowiek żył na ograniczonej powierzchni objawił się pewnym zacieśnieniem wzajemnych kontaktów. Dzień po dniu w trakcie ciągłego postępu cywilizacji ograniczona powierzchnia Ziemi zaczęła wiązać ludzi coraz ściślej ze sobą za pomocą wielu środków, w rezulta-

cie czego człowiek w obecnej epoce jest już wysoce wyspecjalizowaną i skomplikowaną istotą psychofizyczną.

Bez wątplenia najlepszym środkiem zjednoczenia ludzkości są systemy łączności, które pozwalają na masowe rozprzestrzenianie wszelkiego rodzaju wiadomości. Należy się spodziewać, że w ciągu następnych pokoleń łączność rozwinie się jeszcze bardziej i przyczyni się do obalenia bariery nacjonalizmu i wzajemnych uprzedzeń.

11. ZADANIA UIT

Powstała w 1865 roku UIT /Międzynarodowa Unia Telekomunikacyjna/ jest najstarszą międzynarodową organizacją i dlatego jest jak najbardziej upoważniona do przyczyniania się do zjednoczenia ludzkości. UIT powinna koordynować dalekosiężną łączność na powierzchni Ziemi za pośrednictwem sztucznych satelitów oraz sprawy łączności z Księżycem, Marsem i innymi obiektami w przestrzeni kosmicznej. Dalszym krokiem UIT powinno być stopniowe ustalenie przepisów międzynarodowych i dopilnowanie ich przestrzegania przez wszystkie państwa. Spełnienie wszystkich tych zadań jest pracą dla kilku pokoleń. Następnie muszą być zniesione wszelkie ograniczenia narodowościowe i UIT musi występować nie tylko jako przedstawiciel ludzkości, ale i jako obrońca praw innych ewentualnych mieszkańców odległych obszarów kosmosu.

W czasie ostatniego wystąpienia pan G. Beadle, poprzedni przewodniczący angielskiej telewizji wyraził pogląd, że światowy system łączności może przełamać barie-

ry językowe i dać wszystkim poczucie, że jesteśmy obywatelami jednego świata. Słowa te pozostają w całkowitej zgodzie z duchem niniejszego artykułu.

621.396.029.63/64

KOMUNIKACJA MIKROFALOWA^{1/}

J.H. Vogelmann - Microwave Communications. Proceedings of the IRE, 1962 r, str. 907-909.

1. WSTĘP

Artykuł ten jest próbą przedstawienia w skróconej formie zagadnień związanych z komunikacją mikrofalową w przeszłości, teraźniejszości i przyszłości.

W pracy niniejszej komunikacja mikrofalowa została ograniczona do komunikacji wykorzystującej fale o długości poniżej 40 cm. Przy takim ograniczeniu można rozróżnić cztery główne rodzaje komunikacji mikrofalowej:

1. Linie radiowe o zasięgu horyzontowym^{2/}.
2. Systemy pozahoryzontowe wykorzystujące zjawisko rozproszenia troposferycznego.
3. Systemy pozahoryzontowe wykorzystujące sztuczne satelity zarówno bierne jak i czynne.
4. Systemy "zamknięte" wykorzystujące rozchodzenie się fali typu TE 01 w falowodach okrągłych.

^{1/} Na podstawie oryginału opracował R. Zienkiewicz.

^{2/} 0 zasięgu optycznym.

Pierwsze dwa rodzaje łączności osiągnęły już dojrzałość w postaci wielu pracujących na całym świecie sieci. Ostatnie dwa natomiast przeżywają swoje dzieciństwo, znajdując się dopiero na progu pełnego zastosowania.

2. PRZESZŁOŚĆ

W roku 1864 James Clark Maxwell ustalił podstawy komunikacji mikrofalowej swoją teorią fal elektromagnetycznych, którą wykorzystywał do wyjaśnienia zjawisk występujących przy rozchodzeniu się fal świetlnych. W roku 1888 Heinrich Herz wykorzystując nadajnik iskrowy i anteny paraboliczne wytworzył i odebrał fale elektromagnetyczne o długości 60 cm. W latach następnych do roku 1898 inni badacze wytwarzali tymi samymi metodami fale krótsze, nawet o długości 0,4 cm.

W roku 1893 J.J. Thomson w swojej książce "Recent Researches in Electricity and Magnetism" /"Nowe badania elektryczności i magnetyzmu"/, opublikował pierwszą analizę sugerującą możliwość rozchodzenia się fal w pustych rurach. W roku 1897 lord Rayleigh opublikował analizę rozchodzenia się fal w rurach wypełnionych dielektrykiem i to zarówno dla rur o przekroju kołowym, jak i prostokątnym. W roku 1895 Victor von Lang przepuszczał fale elektromagnetyczne przez rury o znacznej długości. Pokazane przez Marconiego oczywiste zalety fal dłuższych i łatwość zastosowania lamp próżniowych w technice fal długich wstrzymały na pewien czas postęp w dziedzinie mikrofal.

Wynaleziony w roku 1920 generator z lampą mającą dodatni potencjał siatki, zwany generatorem Barkhausena, umożliwił skuteczną generację fal o długości 40 cm; spowodowało to wzrost zainteresowania zakresem fal centymetrowych. W roku 1929 André G. Clavier, pracujący wówczas w Laboratoire Central de Télécommunication w Paryżu, chcąc udowodnić niesłuszność ogólnie wówczas panującego poglądu o konieczności stosowania przede wszystkim linii przewodowych, rozpoczął prace eksperymentalne nad wprowadzeniem łączności radiowej.

W roku 1930 w USA w New Jersey rozpoczęto próby łączności mikrofalowej. W próbach tych wykorzystywano anteny paraboliczne o średnicy 10 stóp /około 3,05 m/. Prawie w tym samym czasie, tj. 31 marca 1931 roku, Clavier wraz z współpracownikami zademonstrował we Francji nowy rodzaj łączności radiowej. Komunikacja na 40 kilometrowej trasie Calais-Dover wykazała, że mikrofałe mogą zapewnić nadzwyczajną ekonomię, jakość, niezależność i operatywność. Zastosowane urządzenia umożliwiły transmisję sygnałów telefonicznych i dalekopisowych. Wykorzystano fale o długości 17,6 cm, przesyłane za pomocą reflektorów parabolicznych o średnicy 3 m w wiązkach o szerokości 4° . Moc wyjściowa nadajnika wynosiła ułamki wata. Po tych próbach André Clavier w roku 1933 uruchomił pierwsze usługowe łącze mikrofalowe pomiędzy Lympe w Anglii a St. Inglevert we Francji.

W roku 1933 Marconi opublikował wyniki prób, które wykazały, że fale o częstotliwości 500 MHz rozchodzą się znacznie poza horyzont.

W roku 1936 Carson, Mead i Schelkumoff pracujący w laboratorium f-my Bell Telephone ogłosili w pracy: "Hyper frequency waveguides" /"Prowadnice falowe nadzwyczaj wielkich częstotliwości"/ teorię falowodów, a G.C.Southworth opublikował wyniki swoich eksperymentalnych prac prowadzonych na ten sam temat. Publikacje te są podstawą, na której opierają się wszystkie dalsze prace na temat okrągłych falowodów z polem typu TE 01. W tym samym roku W.L. Barrow z MIT ogłosił pracę "Transmission of Electromagnetic Waves in Hollow Tubes of Metal" /"Rozchodzenie się fal elektromagnetycznych w pustych rurach metalowych"/. Nieco wcześniej w 1934 roku Southworth przesłał z małym tłumieniem sygnały telefoniczne i telegraficzne za pośrednictwem fali o długości 15 cm przez rurę metalową o długości 875 stóp /około 267 m/ i o średnicy wewnętrznej 5 cali /około 12,7 cm/.

W początkach roku 1939 rozpoczęto doświadczenia z magnetronami małej mocy pracującymi w zakresie 30 GHz, a w lipcu 1939 roku Clavier opublikował wyniki przeprowadzonych przez siebie badań nad rozchodzeniem się fal milimetrowych, zbliżając tym samym jeszcze bardziej dzień, w którym okrągłe falowody staną się głównym środkiem łączności .

W roku 1941 zostały przeprowadzone pierwsze badania propagacji pozahoryzontowej dla fal o częstotliwości 3000 MHz. Próby te trwające od maja do grudnia były wykonane na południu Francji w pobliżu Tulonu. Prowadzone one były na zlecenie francuskiego Ministerstwa Obrony, a kierował nimi André G. Clavier. Używano anten rożko-

wych i nadajnika z klistronem o mocy 10 W i o modulacji częstotliwości. Nadajnik znajdował się na lądzie, a odbiornik na pokładzie okrętu. Stwierdzono znacznie większy poziom odbieranych sygnałów od mocy szumów odbiornika w odległości 103 mile /165 km/ od nadajnika i 43 mile /69 km/ poza horyzontem. Badania te dostarczyły podstawowych wiadomości na temat zastosowania mikrofal w łączności pozahoryzontowej.

W roku 1944 André G. Clavier i V. Altovsky opublikowali wyniki prac eksperymentalnych, na podstawie których wybrano modulację częstotliwości jako optymalną dla horyzontowych mikrofalowych linii radiowych.

W roku 1946 do francuskiej sieci łączności pocztowej /PTT/ została włączona 12-kanałowa linia radiowa FM, pracująca pomiędzy Paryżem a Montmorency.

W tym samym okresie w laboratorium f-my Bell Telephone pod kierunkiem Haralda T. Friis'a prowadzono prace nad stworzeniem systemu, który umożliwiłby budowę linii radiowych dalekiego zasięgu z wielu stacjami przekąźnikowymi. Wynikiem tej pracy, opóźnionej przez 5 lat wojny, była linia radiowa Nowy Jork - Boston, opisana przez Friis'a w Bell System Technical Journal /kwiecień 1948/. W tym okresie ustaliły się podstawowe rodzaje anten, stosowane w liniach radiowych, tj. anteny różkowe z reflektorami, anteny z soczewkami metalicznymi i anteny paraboliczne.

Od roku 1950 w National Bureau of Standards, w Lincoln Laboratory of the Massachusetts Institute of Technology i w laboratoriach f-my Bell Telephone, rozpoczę-

to na szeroką skalę badania teoretyczne i eksperymentalne propagacji troposferycznej mikrofal poza horyzontem. Zjawisko rozproszenia jest tłumaczone przez H.G. Booker'a, J.T. Bettencourt'a i W.E. Gordona ziarnistą budową turbulentnej troposfery, to jest istnieniem "kuleczek" o współczynnikach refrakcji różniących się od średniej wartości współczynnika otaczającego ośrodka. Inni badacze: T.J. Carrol, R.M. Ring, H.T. Friis, A.B. Crawford i D.C. Hogg tłumaczą zjawisko rozproszenia częściowymi odbiciami na granicach warstw refrakcyjnych.

K. Bullington, zespół badaczy z laboratorium Lincolna, D. Dawidson, A.J. Pote oraz badacze z National Bureau of Standards wnieśli dalszy poważny wkład do obecnej znajomości troposferycznej propagacji mikrofal. Prace te były podstawą do wprowadzenia pozahoryzontowej komunikacji mikrofalowej.

W roku 1955 lotnictwo Stanów Zjednoczonych rozpoczęło w niedostępnych okolicach Labradoru budowę łańcucha stacji łączności na falach rozproszonych w troposferze. W dwa lata później uruchomiono pierwszą w świecie usługową pozahoryzontową linię radiową pomiędzy Sycylią a Minorką, przeznaczoną do łączności telefonicznej pomiędzy Hiszpanią a Włochami.

Wypuszczenie przez Związek Radziecki 4.10.1957 r. Sputnika I, było pierwszym krokiem w kierunku komunikacji satelitarnej. Mimo że urządzenia radiowe tego satelity pracowały w zakresie fal dekametrowych, był to jednak pierwszy nadajnik komunikacyjny znajdujący się na orbicie Ziemi.

6.12.1958 r. Pionier III wniósł do przestrzeni kosmicznej na czas 38,1 godziny pierwszy nadajnik mikrofalowy pracujący na częstotliwości 960,5 MHz. Prawie w tym samym czasie 12.12.1958 r. Stany Zjednoczone w ramach planu "Score" umieściły na orbicie pierwszego satelitę komunikacyjnego. Chociaż ten system łączności pracował w zakresie fal metrowych, był on prekursorem mikrofalowej komunikacji satelitowej.

Pierwszym biernym satelitą komunikacyjnym było "Echo" wystrzelone 12.8.1960 r. przez National Aeronautics and Space Agency. Satelita ten pozwolił na wykonanie skutecznych prób łączności mikrofalowej w kierunku wschód-zachód, pomiędzy laboratorium firmy Bell Telephone i Jet Propulsion Laboratory of California Institute of Technology, w kierunku północ-południe przez Rome Air Development Centre, oraz między stanami Iowa i Kansas przez Collins Radio.

W czasie pisania tego artykułu trwały rozmowy pomiędzy przedstawicielami przemysłu elektronicznego i NASA na temat umieszczenia na orbicie satelity czynnego, który rozpocząłby międzykontynentalną usługową łączność mikrofalową, a tym samym zasięg komunikacji mikrofalowej zwiększyłby się w stopniu nigdy dotychczas nieosiągalnym.

3. TERAŹNIEJSZOŚĆ

W ciągu trzydziestu lat, które minęły od chwili pierwszej udanej próby łączności mikrofalowej na jednym odcinku, komunikacja mikrofalowa poczyniła bardzo duże postępy.

3.1. Horyzontowe linie radiowe

Obecnie horyzontowe linie radiowe pracują we wszystkich częściach świata, zapewniając niezawodną łączność pomiędzy różnymi ośrodkami i przenosząc zarówno tysiące sygnałów telefonicznych, różne dane, jak i sygnały telewizyjne. Horyzontowe linie radiowe są również głównym środkiem łączności wojska przesyłającym wiadomości do odległych ośrodków łączności.

Ogólnie przyjęty rodzaj modulacji jest FM, przy czym stosowane moce nadajników są rzędu wata. W celu uniezależnienia się od warunków propagacji jest najczęściej stosowany częstotliwościowy odbiór zbiorczy. Przeważnie są stosowane dwie częstotliwości nośne i dodawanie sygnałów metodą kwadratów stosunków /ratio-squared/. Stosowany jest również poczwórny odbiór zbiorczy częstotliwościowo-przestrzenny. Wśród stosowanych urządzeń antenowych zasługują na wymienienie: anteny paraboliczne, reflektory płaskie, anteny z soczewkami metalicznymi oraz różne rodzaje anten rożkowych.

Powszechnie są wykorzystywane częstotliwości aż do 12 GHz. Zdarzają się szerokości przesyłanego pasma rzędu 50 MHz. Znaczne uniezależnienie się od odbić, wprowadzanych przez nieidealnie dopasowane anteny, uzyskano dzięki zastosowaniu izolatorów ferrytowych, które tym samym zmniejszają szumy intermodulacji nadajników klistronowych. Również dzięki zastosowaniu izolatorów ferrytowych możliwe jest uzyskanie dużej liniowości koniecznej w magistralnych liniach radiowych przesyłających sygnały telewizji kolorowej.

Horyzontowe linie radiowe stały się obecnie powszechnym środkiem łączności i to zarówno w sieciach publicznych, jak i różnych specjalnych.

3.2. Komunikacje wykorzystujące fale rozproszone w troposferze

Główną przeszkodą nie pozwalającą na wykorzystanie linii horyzontowych są długie odcinki nad wodami. Przy wykorzystaniu fal rozproszonych w troposferze przeszkody takie stają się nieistotne, jak i nieistotne będą różne inne trudności charakteru geograficznego czy klimatycznego. Od czasu uruchomienia pierwszej linii Sardinia - Minorka, komunikacja na falach rozproszonych nabrała znaczenia ogólnoświatowego, w szczególności stosowana była w amerykańskich liniach dalekiego zasięgu. Rozwój tego rodzaju łączności był spowodowany w znacznym stopniu potrzebami ministerstwa obrony USA. Obecnie poszczególne odcinki linii wykorzystujących fale rozproszone przekraczają nawet długości 700 mil /1100 km/, przy czym mogą być takie linie wykorzystywane do przesyłania 240 kanałów, z których każdy ma szerokość 4 kHz. Stosowane są nadajniki o mocy rzędu 50 kW i ogromne anteny o średnicy 120 stóp /36,6 m/. Z drugiej strony coraz większe zastosowanie w różnych służbach wojskowych znajdują mniejsze urządzenia przewoźne zainstalowane na samochodach i przystosowane do przewożenia. Obecnie do łączności na falach rozproszonych są wykorzystywane następujące pasma częstotliwości: 755 - 985 MHz, 1,7 - - 2,4 GHz, 4,4 - 5 GHz, ale rozpoczęto już budowę urzą-

dzeń dla pasma 7,125 - 8,5 GHz i dla większych częstotliwości. Wykazano możliwość wykorzystania łączności na falach rozproszonych dla komunikacji "ziemia - powietrze" o zasięgu do 1000 mil /1600 km/, ale taki system łączności nie został jeszcze urzeczywistniony.

Jak wykazały doświadczenia, łączność na falach rozproszonych nadaje się dobrze do tworzenia linii dalekiego zasięgu ze stacjami przekaźnikowymi i to zarówno dla celów cywilnych, jak i wojskowych. Największą z obecnie pracujących sieci łączności tego typu jest sieć lotnictwa USA nazwana "White Alice Dew Line". Sieć ta obejmuje Alaskę i najbardziej na północ wysuniętą część Kanady. Sieć "White Alice" została połączona z siecią dalekiego zasięgu cywilnej łączności stanowej Alaski. Pomiar jakości transmisji linii składających się z wielu odcinków wykazały możliwość uzyskania dużej pewności pracy i liniowości całego łącza.

Ponieważ jednak na poszczególnych odcinkach występują bardzo krótkie, głębokie zaniki, to w celu uzyskania wymaganej pewności pracy opracowano, wypróbowano i zastosowano w różnych urządzeniach różne metody odbioru zbiorczego. Najczęściej jest stosowany przestrzenny odbiór zbiorczy, w którym zarówno do odbioru, jak i nadawania są stosowane po dwie anteny. Taki podwójny przestrzenny odbiór zbiorczy, dzięki wykorzystaniu różnych polaryzacji, bywa rozszerzany na poczwórny odbiór zbiorczy, przy czym linia może być przystosowana do przesyłania sygnałów w obu kierunkach. Próbowano również czasowy odbiór zbiorczy oraz tzw. kątowy odbiór

zbiorczy. Na przykład w opracowanej przez Rome Air Development Center metodzie kąтового odbioru zbiorczego wykorzystano bardzo dużą /w porównaniu z długością fali/ antenę o wielu listkach głównych rozłożonych dokoła ortodromy. Sygnały przychodzące do anteny poszczególnymi nieskorelowanymi drogami są następnie sumowane. Metoda ta w połączeniu z częstotliwościowym odbiorem zbiorczym pozwala uzyskać pewną łączność na długich odcinkach i przy wykorzystaniu częstotliwości 8 GHz lub nawet większych.

Praktycznie są stosowane różne metody sumowania, tj. wybieranie, dodawanie liniowe i dodawanie kwadratów stosunków. W metodzie "wybierania" jest wykorzystywany tylko sygnał najsilniejszy, wszystkie pozostałe są odłączane i energia ich nie jest wykorzystana. W metodzie sumowania liniowego wszystkie sygnały są bezpośrednio dodawane, przy czym żaden z sygnałów nie jest uprzywilejowany. W tej metodzie głęboki zanik na którejkolwiek z dróg zwiększa wyraźnie szumy sygnału wypadkowego, pogarszając go. Najlepszą metodą jest metoda kwadratów stosunków, w której każdy z sygnałów przed zsumowaniem jest przyłożony do układu nieliniowego o charakterystyce kwadratowej. W ten sposób zostaje wprowadzone wypuklenie poszczególnych sygnałów proporcjonalne do stosunku sygnału do szumów. W rezultacie metoda ta jest zbliżona, z dokładnością nie mniejszą niż 1 dB, do idealnego teoretycznego układu sumującego. Stosuje się sumowanie w obwodach pośredniej częstotliwości, przy czym oscylatory lokalne są tak sterowane, aby fazy dodawanych sygnałów p.cz. były optymalne.

W wielu urządzeniach stosuje się również dodawanie sygnałów po detekcji. Czasami np. przy poczwórnym odbiorze zbiorczym jest stosowane zarówno dodawanie sygnałów p.c.z., jak i dodawanie po detekcji. Jak wykazały przeprowadzone doświadczenia w liniach pracujących na falach rozproszonych, możliwe jest uzyskanie ogólnej pewności pracy nawet 99,999% i to przy przesyłaniu danych cyfrowych.

3.2. Systemy komunikacji satelitarnej

Pierwszy raz wykorzystano satelity do komunikacji mikrofalowej w roku 1960. Mimo że pierwsze próby miały charakter eksperymentalny, udowodniły one możliwość praktycznego zastosowania tego rodzaju łączności. Wystrzelony na orbitę 12.VIII.1960 r. satelita bierny "Echo", został wykorzystany do przesyłania sygnałów pomiędzy laboratorium firmy Bell Telephone znajdującym się w Holmdel stanie Nowy Jork i Jet Propulsion Laboratory of NASA znajdującym się w Goldstone w Kalifornii. Wspomniany satelita był balonem z metalizowanego plastyku o średnicy 100 stóp /30,5 m/ i krążył po orbicie około 1000 mil /1600 km/ nad powierzchnią Ziemi. Urządzenie odbiorcze o bardzo niskich szumach składało się z anteny półkulkowo-parabolicznej o niskich szumach, szerokopasmowego wzmacniacza z maserem, w którym pracował kwapiec CO_2 - nu chłodzony ciekłym helem oraz odbiornik ze sprężeniem zwrotnym, dzięki któremu można było odebrać taki sygnał EN, który w zwykłym odbiorniku zaginąłby wśród szumów.

łącznie antena i maser pozwalały zmniejszyć stokrotnie moc szumów cieplnych w porównaniu do szumów zwykłej mikrofalowej stacji odbiorczej.

Ten sam bierny satelita był wykorzystany równocześnie do łączności w kierunku północ-południe, przez Rome Air Development Center. Właśnie na tej trasie odebrano po raz pierwszy wiadomości odbite od powierzchni sztucznego satelity. Nadajnik był umieszczony w ośrodku RADC na Trinidad w Brytyjskich Indiach Zachodnich, a odbiornik we Floyd w stanie Nowy Jork. Na Trinidad zainstalowane było śledzące urządzenie radarowe przystosowane do równoczesnego nadawania sygnałów radarowych i sygnałów łączności, przy czym radar w zwykły sposób wykrywał i śledził satelitę wykorzystując energię odbitą z powrotem w kierunku nadawania. Po stronie odbiorczej we Floyd anteny pomocnicze odbierały sygnały radarowe określając kierunek ustawienia głównej 33 stopowej /10,6 m/ anteny parabolicznej wykorzystywanej do komunikacji. Za pośrednictwem fali nośnej 2270 MHz przesyłano zarówno sygnały telefoniczne czy dalekopisowe, jak i dane cyfrowe. Zrozumiałość sprawdzano za pomocą specjalnego testu /PB50/. Doświadczenia wykonane na obu opisanych powyżej trasach wykazały, że komunikacja mikrofalowa wykorzystująca bierne satelitowe stacje przekaznikowe może być zrealizowana i to o jakości odpowiadającej zarówno dla celów wojskowych, jak i usług cywilnych.

Czynny satelita "Courier" został umieszczony na orbicie 4.X.1960 r. Satelita ten został zbudowany do prze-

kazywania "z opóźnieniem" rozmów, obrazów nieruchomych i danych cyfrowych z dużą prędkością. Kształtem satelity jest zbliżony do kuli o średnicy 52 cale /132 cm/. Ciężar satelity 500 funtów /227 kg/. Większa część jego powierzchni /80%/ jest pokryta 19152 ogniwami słonecznymi, które służą do zasilania wewnętrznych urządzeń elektronowych. Urządzenia satelity odbierają sygnały o częstotliwościach zawartych w pasmie 1,7 do 1,8 GHz, a nadają przy retransmisji w pasmie 1,8 do 1,9 GHz. Zdolność magazynowania informacji określono na 13200000 bitów dla każdego z czterech umieszczonych na satelicie magnetofonów taśmowych. Szybkość nadawania wynosi 55000 bitów/sek. Współpracujące stacje naziemne mają moce nadajników 1000 W, natomiast moc nadajnika satelity wynosi 4 W. Zmagazynowane przez satelitę informacje są retransmitowane po otrzymaniu sygnałów w Ziemi. Całkowity czas nadawania informacji zmagazynowanych w jednym magnetofonie wynosi 4 minuty.

Satelita "Courier" poza retransmisją z opóźnieniem może być wykorzystywany do retransmisji bezpośredniej, to jest do równoczesnego odbierania i nadawania tych samych sygnałów. Orbita satelity jest oddalona o 750 mil /1200 km/ od powierzchni Ziemi. "Courier" jest wykorzystywany codziennie, w czasie okresów widoczności, do przesyłania 6000000 słów w postaci sygnałów dalekopisowych pomiędzy stacją naziemną ośrodka badawczego armii USA w Fort Monmouth w stanie Nowy Jork a stacją w Salines na Puerto Rico.

3.4. Falowody okrągłe TE 01

Potrzeba przesyłania dużych ilości informacji, to jest szerokich pasm, na duże odległości jest bodźcem rozwoju komunikacji wykorzystującej falowody o przekroju okrągłym i o rozkładzie pola typu TE 01. Nieograniczona praktycznie szerokość pasma w zakresie fal milimetrycznych oraz możliwość uzyskania małych tłumień przy odpowiednio dużej średnicy falowodu skłoniły wielkie towarzystwa telefoniczne do rozpoczęcia szczegółowych badań. W Stanach Zjednoczonych w laboratoriach firmy Bell Telephone opracowano konieczne urządzenia do zastosowania tego rodzaju łączności falowodowej dla linii dalekiego zasięgu. Między innymi opracowano konieczne filtry rodzajów pola oraz technikę umożliwiającą zginanie falowodu. Główny falowód o średnicy 2 cale /50,8 mm/ tworzą tu spiralnie zwinięte druty miedziane. Ściśle /zwoj przy zwoju/ nawinięta spirala jest pokryta masą pochłaniającą energię niepożądanych pól i jest zamknięta w stalowej rurze.

W Anglii w laboratorium firmy Standard Telephones and Cables Ltd. demonstrowano giętki okrągły falowód o rozkładzie pola typu TE 01. Falowód o średnicy około 3 cali /76,0 mm/ był zbudowany ze spiralnie zwiniętych drutów aluminiowych. Ściśle zwinięta spirala miała na zewnątrz powłoki: wodoodporną i wzmacniającą. W falowodach tego typu przy niezbyt dużych zgięciach falowodu fale elektromagnetyczne są tłumione nieznacznie oraz nie występuje nadmierna szkodliwa zmiana rodzaju pól.

Jak się przewiduje, falowody takie pracując w zakresie fal milimetrycznych będą miały tłumienie 2 do 3 dB na milę /1,2 do 1,9 dB/km/. Odpowiednie stacje wzmacniakowe umieszczone na całej trasie w odstępach 20 mil /32 km/ mają zapewnić wymagany stosunek sygnału do szumów na końcu linii. Ten sposób przesyłania sygnałów przez okragły falowód zademonstrowano po raz pierwszy w roku 1960 w Anglii w Fromgore Hall. Pokazano tam falowód o średnicy 2 3/4 cala /7 cm/ ułożony w pętli o długości 3600 stóp /1100 m/. Pętla składała się z 2 odcinków równej długości, z których jeden wykonany był z falowodu spiralnego, a drugi z falowodu prostego. Przez tę pętlę przesyłano obrazy telewizyjne dużej jakości. Przy przesyłaniu sygnałów falowodem na dłuższe odległości występują zniekształcenia spowodowane różnymi czasami opóźnień grupowych dla różnych częstotliwości oraz szczątkową energią niepożądanych rodzajów pól. Dla odtworzenia pierwotnych sygnałów bez zniekształceń, konieczne jest zastosowanie modulacji kodowej impulsów. Przewiduje się, że ten rodzaj modulacji będzie też wykorzystywany w przyszłości. Rozkład pola TE 01 pozwala na przesłanie falowodem sygnałów o pasmie 10000 MHz lub większym. Tego rzędu szerokość pasma wystarcza do równoczesnego przesłania co najmniej 400 sygnałów telewizyjnych lub 1000000 sygnałów telefonicznych.

4. PRZYSZŁOŚĆ

Rozpoczęty 20 lat temu rozwój komunikacji mikrofalowej przekracza wszelkie oczekiwania. Zapowiada to, że

komunikacja mikrofalowa stanie się w przyszłości najważniejszym środkiem łączności. Nacisk spowodowany wykorzystaniem wszystkich mniejszych częstotliwości będzie się stale zwiększał i będzie powodował stałe przesuwanie się poszczególnych służb w stronę coraz większych częstotliwości. Prawdziwa ocena przyszłości może być dokonana tylko w oparciu o obecne plany rozwoju i badań. Właśnie na tej podstawie oparte są poniższe przewidywania.

4.1. Linie o widoczności horyzontowej

Linie radiowe o widoczności horyzontowej będą nadal podstawą szerokopasmowych sieci łączności. Wykorzystywane moce zwiększą się, używane będą coraz większe częstotliwości. Linie o widoczności horyzontowej będą coraz szerzej stosowane również na krótkich odcinkach do połączeń różnych użytkowników poprzez ośrodki łączności z liniami magistralnymi. W celu zwiększenia pewności pracy, razem z używanym już częstotliwościowym odbiorem zbiorczym, będzie używany przestrzenny odbiór zbiorczy. /Większe moce i większe zyski anten pozwolą zwiększyć odległość pomiędzy stacjami lub rozszerzyć pasmo przesyłanych sygnałów/. Poza lepszymi urządzeniami i elementami największą nowością będzie zastosowanie ruchomych stacji końcowych linii radiowych, zarówno na pojazdach poruszających się w otoczeniu atmosfery, jak i na pojazdach orbitalnych. Przy budowie tych jak i innych typów stacji ruchomych, duże znaczenie będzie miała technika ciała stałego. W celu przesłania większej liczby sygna-

łów w tym samym pasmie będzie stosowane przesyłanie zwielokrotnionych sygnałów za pomocą modulacji jednostęgowej z strumioną falą nośną. Natomiast modulacja częstotliwości o dużych wskaźnikach będzie pozwalać na powiększenie koncentracji stacji.

4.2. Komunikacja wykorzystująca fale rozproszone w troposferze

Ze względu na wzajemne zakłócenia już obecnie istnieje pilna potrzeba opracowania urządzeń wykorzystujących fale rozproszone i pracujących w zakresie większych częstotliwości. W wielu krajach do celów komunikacji na falach rozproszonych mogą być wykorzystywane tylko częstotliwości większe od 5 GHz. Badany obecnie eksperymentalnie przez Rome Air Development Center kątowy odbiór zbiorczy pozwoli przewyciężyć większe tłumienie tras i ograniczone moce nadajników występujące przy krótszych falach /o długości poniżej 4 cm/ przez lepsze dopasowanie apertury anteny do środowiska transmitującego energię. Po opracowaniu linii wykorzystujących większe częstotliwości mikrofalowe będą mogły pracować na odcinkach 200 - 250 mil /320 - 400 km/, wówczas mniejsze częstotliwości będą mogły być wykorzystane do odcinków długich: 750 do 1000 mil /1200 do 1600 km/.

Krotność przesyłanych sygnałów będzie stopniowo wzrastać aż do 600 kanałów telefonicznych, równocześnie moc nadajników osiągnie 100 kW. Użycie w odbiornikach wzmacniaczy parametrycznych zmniejszy wpływ zaników, dzięki czemu wzrośnie ogólna pewność pracy. Wzrost pewności pra-

cy umożliwi przesyłanie danych cyfrowych z dużą szybkością, nawet przez kilkuodcinkowe dalekosiężne linie tego rodzaju.

Sygnaly o częstotliwości 400 MHz mogą być odbierane w odległościach ortodromowych ponad 2500 mil /4000 km/. Mechanizm tej propagacji ma prawdopodobnie charakter niekoherentnego rozproszenia wzbudzonego przez fluktuacje gęstości elektronów w całej objętości stożka charakterystyki anteny. Dotychczasowa znajomość tego zjawiska wystarcza jednak, aby przewidzieć jego wykorzystanie do celów komunikacji specjalnej.

4.3. Satelitowe stacje przekaźnikowe

W chwili obecnej zagadnienia komunikacji satelitarnej są opracowywane przez różne firmy amerykańskie w ramach ryzyka handlowego. Proponowana jest duża liczba różnych systemów. Najbardziej obiecujące są opisane poniżej.

S a t e l i t y b i e r n e . Zaletami satelitów biernych są pewność pracy i prosta budowa. Wymagają one do współpracy na Ziemi nadajników większej mocy i nadzwyczaj czułych odbiorników. Satelity tego typu ze względu na wspomniane cechy będą stosowane prawdopodobnie tam, gdzie wymagana będzie duża giętkość łączności. Proponowane są cztery rodzaje satelitów biernych. Pierwszy, oparty na udanych doświadczeniach z satelitą "Echo", byłby kulą odbijającą o dużej średnicy. Zaletą tego rodzaju satelitów jest ich prostota wynikająca z braku potrzeby stabilizacji. Drugi rodzaj satelity

biernego to odbijający i rozpraszający energię elektromagnetyczną pas, utworzony z dużej ilości dipoli krążących po orbicie. To rozwiązanie pozwoliłoby uprościć śledzenie satelity, ale umieszczenie dipoli w odpowiednich odstępach na orbicie jest trudne, jak i trudne jest dokładne utrzymanie w czasie ich wzajemnych położeń. Dipole takie poddane byłyby ciśnieniu słonecznemu. Trzecim rodzajem satelity biernego byłby częściowo stabilizowany satelita ze specjalną anteną opracowaną przez Van Atta. Mógłby on znajdować się w takiej odległości od Ziemi, że szerokość charakterystyki anteny obejmowałaby całą Ziemię. Ponieważ antena tego satelity odbijałaby energię w stożku o kącie rozwarcia 45° , a skierowanym w stronę, skąd sygnały zostały odebrane, to wymagania co do stabilizacji takiego satelity nie byłyby ostre. Ostatni rodzaj satelity biernego to rozpraszająca powierzchnia Lamberta. Jest to dowolna powierzchnia wystarczająco nieregularna i chropowata, zniekształcenia której nie powodują efektów szkodliwych i tym samym zachowanie dokładnie kulistego kształtu balonu nie będzie konieczne.

S a t e l i t y c z y n n e. Konstrukcja satelitów czynnych jest bardziej skomplikowana, ale upraszcza się budowa współpracujących z nimi stacji naziemnych i mogą być zmniejszone wymagania dotyczące mocy tych stacji. Można rozróżnić dwa rodzaje satelitów czynnych: pierwszy z magazynowaniem informacji typu "Courier" i drugi retransmitujący natychmiast, w którym częstotliwość odbioru różni się od częstotliwości nadawania. Je-

den satelita typu "Courier" może obsłużyć całą kulę ziemską, jeżeli służby wykorzystujące go mogą dopuścić kilkugodzinne opóźnienie w przekazywaniu wiadomości. Metoda natychmiastowej retransmisji do obsłużenia całej kuli ziemskiej wymaga natomiast zastosowania wielu satelitów i stacji przekaźnikowych na Ziemi. Proponowane jest również zastosowanie do komunikacji czynnego satelity typu Van Atta, w którym pomiędzy odpowiednimi elementami antenowymi włączone byłyby wzmacniacze.

Zarówno czynne, jak i bierne satelity mogą pracować na różnych orbitach.

S a t e l i t a s t a c j o n a r n y , synchroniczny, to jest obiegający Ziemię nad równikiem w ciągu 24 godzin, będzie miał wiele zalet, ale stosunkowo znaczna jego odległość od powierzchni Ziemi /około 36000 km/, zaostrzy wymagania dotyczące urządzeń elektronicznych i wprowadzi zauważalne opóźnienie przesyłanych sygnałów. Wady te będą kompensowane łatwością śledzenia satelity i możliwością pracy ciągłej. Najszybciej należy spodziewać się umieszczenia satelitów na orbicie biegunowej lub przesuniętej o 45° i na wysokościach pomiędzy 1000 a 3000 mil /1600 - 4800 km/. Satelity te będą wymagały zastosowania na obu współpracujących stacjach naziemnych kosztownych anten śledzących oraz w przypadku pracy ciągłej, urządzeń umożliwiających szybkie przerzucenie łączności z jednego satelity na drugi. Rozważane są również obecnie możliwości zastosowania innych satelitów o czasach obiegu po orbitach od 90 minut do 96 godzin.

4.4. Komunikacja falowodowa

Wieloparowe i koncentryczne kable będą niewątpliwie zamieniane przez falowody okrągłe o polu TE 01 i to nie tylko w magistralnych sieciach międzymiastowych, ale i w podziemnych i nadziemnych sieciach miejskich.

5. WNIOSKI

Po około stu latach, które minęły od odkrycia Maxwella, mikrofałe znalazły szerokie zastosowanie w komunikacji, ale to co dotychczas zrobiono jest dopiero skromnym początkiem.

U w a g i t ł u m a c z a

1/ W przedstawionej historii komunikacji mikrofalowej J.H. Vogelmann pomija zupełnie wkład uczonych niemieckich i radzieckich nie wspominając między innymi, że już w czasie II wojny światowej istniała bardzo rozbudowana, o długości kilku tysięcy kilometrów, sieć niemieckich wojskowych wielokanałowych linii radiowych FM łącząca np. Krym z Berlinem poprzez Warszawę.

2/ Prawdopodobnie ze względu na to, że artykuł był pisany w połowie 1961 roku, nie wspomniano w nim o obecnie pracujących satelitach komunikacyjnych "Telstar" i "Relay" oraz o mających w najbliższym czasie rozpocząć pracę satelitach "Advent" i "Syncom". Ponieważ na ten temat były obszerne wzmianki w prasie krajowej, uzupełnianie artykułu nie wydaje się celowe.

NAJNOWSZE OSIĄGNIĘCIA TECHNIKI KOMUNIKACJI MIKROFALOWEJ^{1/}

Artykuł opracowany na podstawie referatu M. Morita: "Recent Development in Microwave Communication Technique" opublikowanego w Journal of the Institution of Telecommunication Engineers. New Delhi. Vol. 8, nr 4 July 1962, str. 202-210.

1. WSTĘP

W niniejszym artykule przedstawiono kilka nowo opracowanych zagadnień z zakresu techniki komunikacji mikrofalowej. Rozwój tej dziedziny jest tak gwałtowny, że obecnie jest realizowane to, co wczoraj uważano za rzecz nieosiągalną. Dlatego konieczne jest aktualne śledzenie postępu i wszystkich ostatnich zdobyczy techniki komunikacji mikrofalowej.

W technice komunikacji mikrofalowej istnieją trzy drogi postępu, a mianowicie:

1. Przesyłanie coraz większej liczby informacji przy użyciu jednego kanału radiowego. Transmisja wysokiej jakości telefonii 1800-krotnej oparta na zaleceniach CCIR jest już dziś możliwa do realizacji; przykładem może być istniejąca linia mikrofalowa Tokio-Osaka.

2. Przekazywanie informacji na większe odległości. Obecnie przy wykorzystaniu zjawiska rozproszenia fal w

^{1/} Opracował na podstawie oryginału J. Derski.

troposferze można uzyskać połączenia o zasięgu 600 - 800 km, przy czym koszty urządzeń będą kształtować się w rozsądnych granicach.

3. Zmniejszenie wymiarów, ciężaru, poboru mocy oraz kosztów urządzeń. W tej dziedzinie wielkie możliwości ma zastosowanie półprzewodników.

2. SZUMY INTERMODULACJI W SYSTEMACH O DUŻEJ OBJĘTOŚCI

Najważniejszymi czynnikami, które ograniczają liczbę kanałów w urządzeniach komunikacji mikrofalowej są szumy cieplne i szumy intermodulacji. Pierwsze są określone przez czynniki takie, jak: nadawana moc, współczynnik szumów odbiornika, zysk anten, głębokość zaników, wskaźnik modulacji i inne. Obliczenie szumów cieplnych jest łatwe; szumów intermodulacji - bardzo skomplikowane.

Szumy intermodulacji mogą być podzielone ze względu na powstawanie na:

1. Szumy generowane w nieliniowych elementach, takich jak wzmacniacz pasma podstawowego, klustron, modulator i dyskryminator FM itp. Szumy te nazywane są szumami zniekształceń nieliniowych.

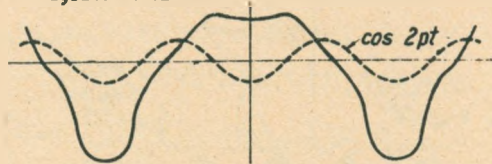
2. Szumy generowane w obwodach biernych, takich jak filtry wzmacniacza pośredniej częstotliwości. Szumy te nazywane są szumami zniekształceń opóźnieniowych, ponieważ są powodowane przez różnice czasów przejścia przez czwórnik różnych częstotliwości będących składowymi sygnału FM.

Oba rodzaje zniekształceń łatwo rozróżnić posługując się rys. 1.

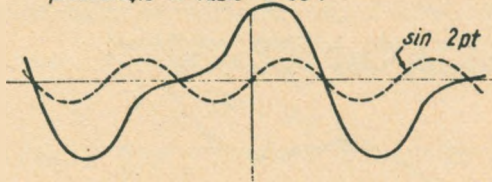
a) Pierwotny sygnał wejściowy



b) Zniekształcony sygnał wyjściowy. Zniekształcenia zgodne w fazie.



c) Zniekształcony sygnał wyjściowy. Zniekształcenia przesunięte w fazie o 90° .

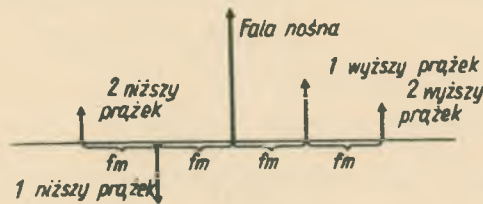


Rys. 1. Zniekształcenia sygnału

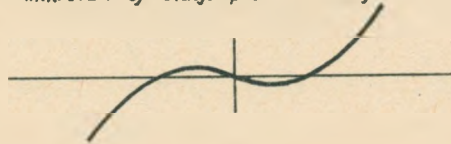
Przypuśćmy, że początkowy sygnał wejściowy jest wyrażony funkcją $\cos pt$, druga harmoniczna wywołana zniekształceniami układów nieliniowych wyrażona będzie wówczas przez $\cos 2pt$, a druga harmoniczna wywołana zniekształceniami układów liniowych, to jest opóźnieniem czasowym, wyrażona będzie przez $\sin 2pt$. Innymi słowy druga harmoniczna spowodowana zniekształceniami nieliniowymi jest w fazie, a druga harmoniczna spowodowana zniekształceniami opóźnienia czasowego jest przesunięta o 90° względem sygnału początkowego.

Do niedawna uważano, że powyższe dwa typy zniekształceń są główną przyczyną szumów intermodulacji. W systemach mikrofalowych o dużej objętości niedawno został odkryty ważny czynnik powodujący szумы intermodulacji. Jest nim zniekształcenie spowodowane kształtem charakterystyki amplituda - częstotliwość wzmacniacza pośred-

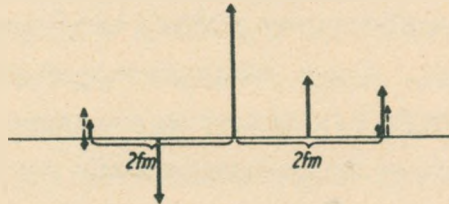
a) Rozkład prążków sygnału pierwotnego o modulacji częstotliwości



b) Charakterystyka amplituda - częstotliwość mikrofalowej stacji przekąźnikowej



c) Zmiana rozkładu amplitud prążków po przejściu sygnału przez stację przekąźnikową



Rys. 2. Zniekształcenia spowodowane przez nie-idealną charakterystykę amplituda - częstotliwość

niej częstotliwości. Jeżeli charakterystyka ta nie jest płaska, to względne amplitudy poszczególnych prążków sy-

gnału FM po przejściu przez układ mogą być zmienione - rys. 2. Oznacza to, że zostały wytworzone nowe prążki, co spowoduje powstanie dodatkowych szumów intermodulacji.

Fakt ten, chociaż oczywisty, nie był zauważony i nie opublikowano dotychczas żadnych danych na ten temat. Zjawisko to odkryli japońscy inżynierowie z Nippon Telegraph Telephone Public Corporation i Nippon Electric Company Ltd., którzy również opracowali korektor zmniejszający te zniekształcenia - rys. 3. Korektor ten został zastosowany w linii mikrofalowej Tokio - Osaka. Wspomniana linia mikrofalowa była zaprojektowana pierwotnie do przesyłania sygnałów telefonii 1200-krotnej. Dzięki zastosowaniu korektora zniekształceń, objętość linii wzrosła na tyle, że stało się możliwe przesyłanie sygnałów telefonii 1800-krotnej.

Zniekształcenia tego rodzaju nie były wcześniej odkryte, ponieważ przeważają one tylko wtedy, kiedy częstotliwość modulująca jest bardzo duża. Dlatego w istniejących systemach mikrofalowych, przystosowanych do przesyłania sygnałów telefonii kilkusetkrotnej, zniekształcenia wywołane charakterystyką amplitudy nie były zauważalne. Natomiast w urządzeniach więcej niż 1800-krotnych zniekształcenia te muszą być uwzględniane jako czynnik najważniejszy.

3. METODY ODBIORU O DUŻEJ CZUŁOŚCI STOSOWANE W KOMUNIKACJI POZAHORYZONTOWEJ

W komunikacji pozahoryzontowej, aby przezwyciężyć ogromne tłumienie, stosuje się duże moce nadajników i ol-

brzymie anteny. Ten rodzaj łączności jest droższy od linii mikrofalowych o zasięgu horyzontowym i może być stosowany tylko w takich okolicznościach, kiedy instalacja lub utrzymanie stacji przekaźnikowych jest wyjątkowo trudne. Jakkolwiek ostatnio rozwój odbiorników o dużej czułości i wzmacniaczy parametrycznych spowodował znaczne zmniejszenie mocy nadajników oraz kosztów instalacji i eksploatacji, to jednak linia radiowa o zasięgu horyzontowym pozostaje nadal rozwiązaniem bardziej ekonomicznym.

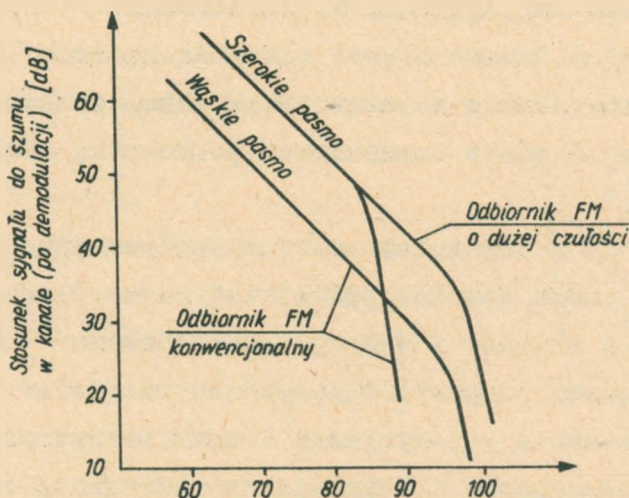
Zasada odbioru o dużej czułości sygnałów o modulacji częstotliwości wyjaśniona jest poniżej.

Modulacja FM jest szeroko stosowana, ponieważ dzięki tak zwanemu zyskowi modulacji polepsza się stosunek sygnału do szumu na wyjściu urządzenia. Jednak modulacja FM ma poważną wadę w postaci progu czułości, to znaczy /rys. 3/, że jeżeli odbierany sygnał stanie się słabszy od pewnego poziomu, to stosunek sygnału do szumu nagle nieproporcjonalnie pogorszy się. Poziom ten jest nazywany mocą progową sygnału FM.

Istnieją dwie metody przesunięcia tego progu: pierwsza polega na zmniejszeniu mocy szumów, a druga na wzroście mocy sygnału. Pierwsza metoda jest metodą zwężenia pasma odbiornika drogą zastosowania ujemnego częstotliwościowego sprzężenia zwrotnego, a druga metodą detekcji fazy z ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Obydwie te metody były opracowane po raz pierwszy przez inżynierów N.E.C. /Nippon Electric Company Ltd/.

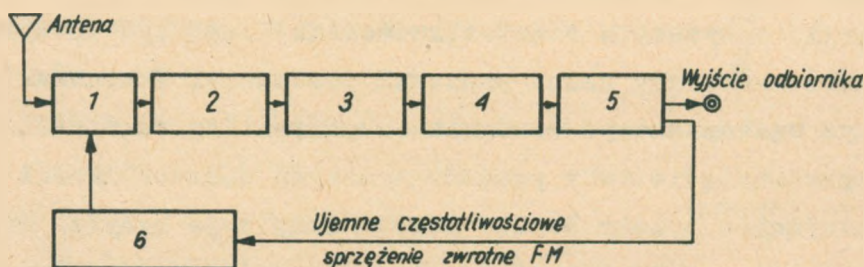
Schemat blokowy układu ze zwężeniem pasma drogą za-

stosowania ujemnego częstotliwościowego sprzężenia zwrotnego jest przedstawiony na rys. 4. Metoda ta przewiduje,



Moc sygnału doprowadzona do wejścia odbiornika
dB w odniesieniu do 1 miliwata [dBm]

Rys. 3. Stosunek sygnału do szumu w funkcji
mocy sygnału



Rys. 4. Schemat blokowy odbiornika ze zwężeniem pasma przy pomocy ujemnego częstotliwościowego sprzężenia zwrotnego

1 - mieszacz, 2 - szerokopasmowy wzmacniacz pośredniej częstotliwości, 3 - pojedynczy obwód rezonansowy o wysokiej dobroci, 4 - ogranicznik i dyskryminator, 5 - wzmacniacz pasma podstawowego, 6 - oscylator lokalny modulowany w częstotliwości

że generator lokalny odbiornika jest modulowany w częstotliwości przez wzmacnione napięcie wyjściowe demodulatora w taki sposób, że dewiacja sygnału za mieszańcem jest znacznie zmniejszona. We wzmacniaczu pośredniej częstotliwości dewiacja jest więc bardzo mała. Tym samym bez wprowadzania zniekształceń można znacznie zmniejszyć szerokość pasma wzmacniacza pośredniej częstotliwości.

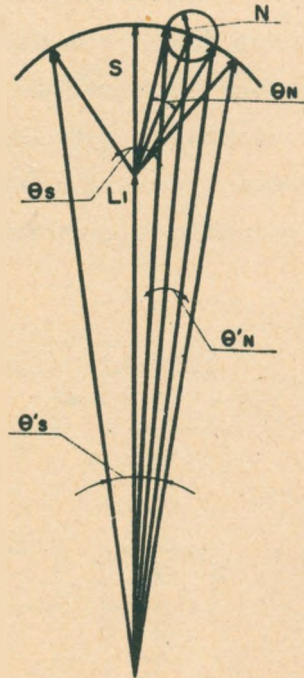
Moc szumów w demodulatorze jest proporcjonalna do szerokości pasma obwodów pośredniej częstotliwości. Przez zastosowanie obwodów o węższym pasmie można znacznie przesunąć punkt progowy. W powyższej metodzie istotne jest zastosowanie pojedynczego obwodu rezonansowego ograniczającego pasmo i wzmacniacza pośredniej częstotliwości o szerokim pasmie. Zagadnienie to zostało rozwiązane przez pracowników NEC.

W układzie tym, jak w każdym układzie z ujemnym sprzężeniem zwrotnym, przesunięcie fazy składowych /tu - modulacji/ o wyższych częstotliwościach musi być dostatecznie małe, aby układ pracował stabilnie. W konwencjonalnym wąskopasmowym wzmacniaczu pośredniej częstotliwości przesunięcie fazy prążków wyższych częstotliwości modulujących byłoby bardzo duże i oscylacje byłyby nie do uniknięcia. Natomiast pojedynczy obwód rezonansowy powoduje przesunięcie fazy poniżej 90° , przy czym tłumienie bocznych prążków może być dowolnie duże, jeżeli tylko współczynnik dobroci obwodu Q będzie dostatecznie duży. Nieznajomością tych zależności można tłumaczyć dawniejsze niepowodzenie przesunięcia progu czułości

przez zastosowanie ujemnego częstotliwościowego sprzężenia zwrotnego, mimo że tego typu sprzężenia były znane już 20 lat temu.

Obecnie metoda częstotliwościowego sprzężenia zwrotnego jest szeroko stosowana w celu zwężenia pasma nie tylko w urządzeniach pozahoryzontowych, lecz również w komunikacji satelitarnej.

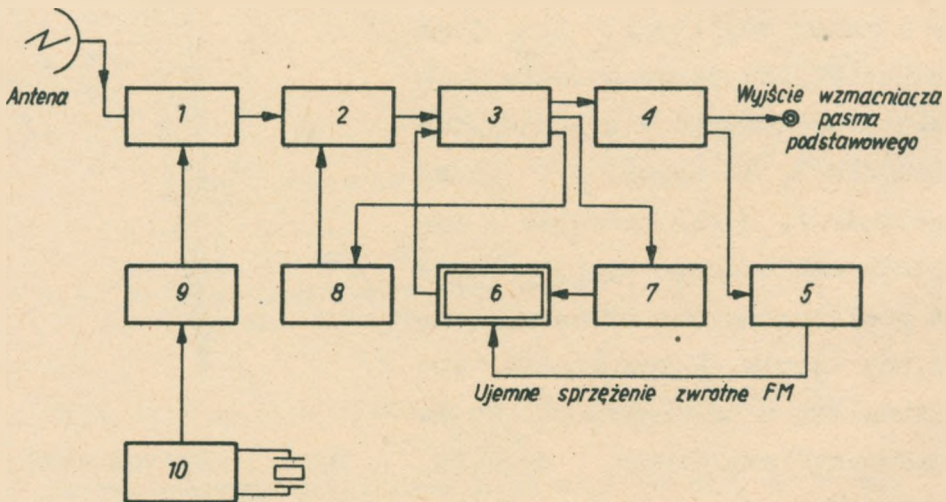
Rozważmy teraz drugą metodę, w której zwiększona jest amplituda sygnału. Jak pokazano na rys.5, odbierany sygnał o modulowanej fazie i małej amplitudzie S jest przekształcany przez dodanie sygnału pomocniczego o znacznej amplitudzie L_1 na sygnał o dużej amplitudzie. W tej metodzie amplituda odbieranego sygnału może być powiększona bez wzrostu amplitudy szumów. W rezultacie amplituda szumu nie będzie mogła przekroczyć amplitudy sygnału, nawet jeśli odbierany sygnał będzie bardzo słaby. Faza modulacji wektora wypadkowego θ_s powinna być proporcjonalna do modulacji wektora sygnału pierwotnego /odbieranego/ θ_s . Warunek ten może być spełniony tylko wtedy, gdy kąt fazowy pomiędzy sygnałem odbieranym a dodanym sygnałem pomocniczym z oddzielnego generatora będzie mały.



Rys. 5. Wykres wektorowy

Wiadomo jednak, że modulacja fazy sygnału odbieranego jest bardzo duża. Te dwa na pozór sprzeczne warunki mogą być spełnione równocześnie, jeżeli będzie zastosowany specjalny rodzaj ujemnego sprzężenia zwrotnego, to jest, jeżeli pomocniczy sygnał wykorzystywany do demodulacji będzie modulowany w częstotliwości przez napięcie wyjściowe detektora fazy. W ten sposób faza sygnału pomocniczego będzie podążała za fazą sygnału pierwotnego.

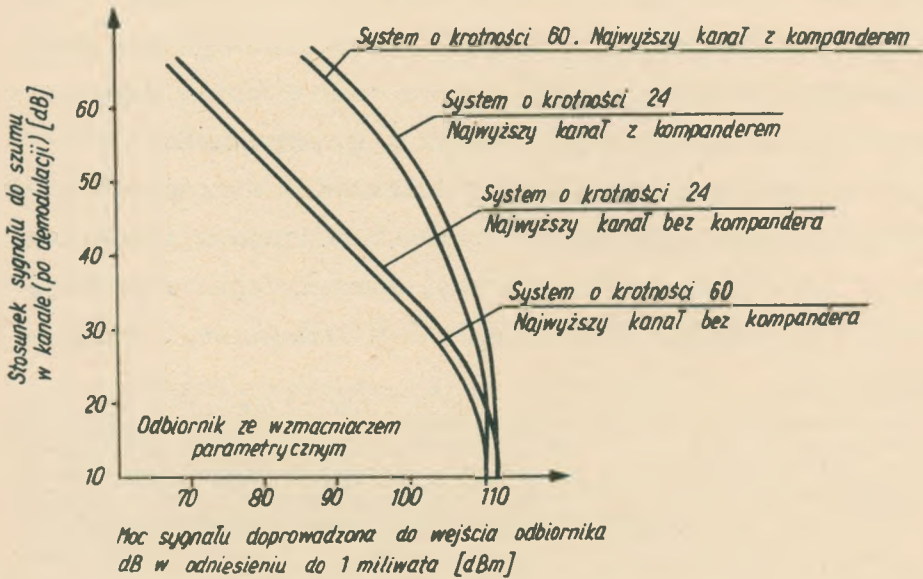
Rysunek 6 przedstawia schemat blokowy odbiornika z detekcją fazy z ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Na rysunku 7 pokazano otrzymane wyniki; widać na nim, że punkt pro-



Rys. 6. Schemat blokowy odbiornika z detekcją fazy z ujemnym sprzężeniem zwrotnym

1 - mieszacz, 2 - wzmacniacz pośredniej częstotliwości, 3 - detektor fazowy, 4 - wzmacniacz pasma podstawowego, 5 - czwórnik pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego, 6 - generator pomocniczy o modulowanej fazie /generator demodulacji/, 7 - układ automatycznej regulacji fazy, 8 - układ automatycznej regulacji wzmocnienia, 9 - powielacz, 10 - oscylator lokalny

gowy nowego odbiornika został znacznie przesunięty. Mimo zastosowania opisanego układu punkt progowy istnieje nadal. Nowy punkt progowy jest spowodowany przez szumy FM wprowadzonego generatora pomocniczego, które krążą w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego. Inaczej punkt pro-



Rys. 7. Stosunek sygnału do szumu w funkcji mocy sygnału

Na rys. 7 nie zaznaczono stosunku sygnału do szumu w odbiorniku konwencjonalnym. Należy porównywać z rys. 3 /uwaga opracow./

gowy odbiornika FM o zwiększonej czułości jest określony przez szerokość pasma wzmacniacza pasma podstawowego, wchodzącego do pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego, podczas gdy punkt progowy odbiornika konwencjonalnego jest określony przez szerokość pasma wzmacniacza pośredniej

częstotliwości. Stosunek szerokości pasma pośredniej częstotliwości do szerokości pasma podstawowego jest więc miernikiem poprawy.

Interesujące jest porównanie obu opisanych powyżej metod odbioru o zwiększonej czułości. W pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego elektryczna długość pętli ujemnego sprzężenia musi być możliwie najkrótsza. Z tego punktu widzenia metoda detekcji fazy ma pewną przewagę nad metodą zwężenia pasma, gdyż w tej ostatniej pętli sprzężenia musi być objęty ogranicznik i dyskryminator.

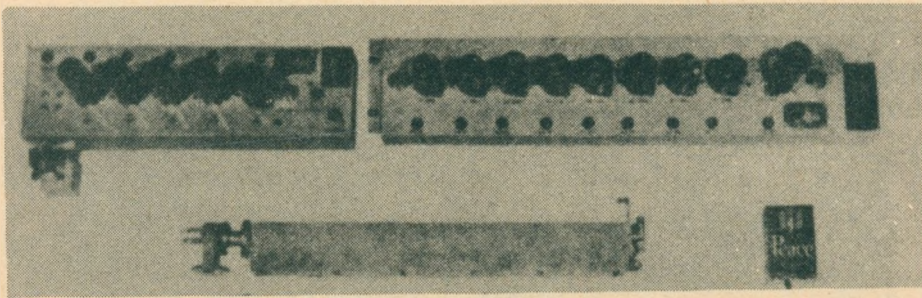
Obie metody odbioru o dużej czułości będą prawdopodobnie szeroko stosowane w różnych rodzajach służb, jak np. w komunikacji satelitarnej, komunikacji ruchomej, liniach o zasięgu horyzontowym i w komunikacji pozahoryzontowej.

4. URZĄDZENIA STACJI PRZEKAŹNIKOWYCH WYKORZYSTUJĄCE ELEMENTY WZMACNIAJĄCE OPARTE NA TECHNICIE CIAŁA STAŁEGO

Rozwój półprzewodników osiągnął obecnie taki poziom, że lampy próżniowe używane w mikrofalowych stacjach przekaźnikowych są stopniowo coraz częściej zastępowane przez elementy wzmacniające oparte na technice ciała stałego. Początkowo wprowadzono tranzystory do obwodów małej częstotliwości, takich jak wzmacniacze pasma podstawowego i urządzenia pomocnicze. Następnie, w miarę rozwoju tranzystorów wielkiej częstotliwości, strazytorowano również wzmacniacze pośredniej częstotliwości.

Aby wzmacniacz pośredniej częstotliwości pracował właściwie przy zmianach temperatury, zmianach napięcia źródła zasilania i napięcia automatycznej regulacji wzmocnienia, projektuje się go tak, aby transmitowane przez niego pasmo było odpowiednio szersze od pasma koniecznego do transmisji. Wymaganą selektywność uzyskuje się przez zastosowanie filtrów o "skupionej selektywności".

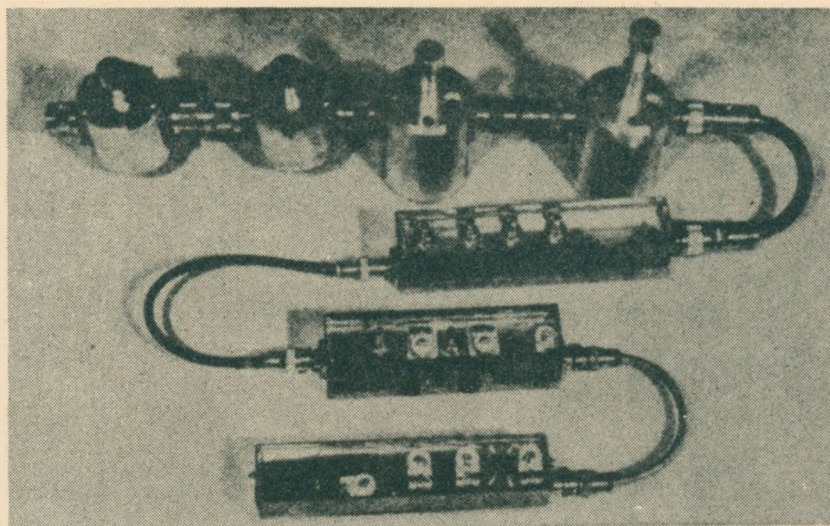
Dla porównania na rys. 8 pokazano dwa szerokopasmowe wzmacniacze pośredniej częstotliwości: konwencjonalny z lampami próżniowymi i tranzystorowany. Obecnie w urządzeniach komunikacji mikrofalowej wszystkie lampy próżniowe z wyjątkiem lamp mikrofalowych mogą być zastąpione tranzystorami.



Rys. 8. Szerokopasmowe wzmacniacze pośredniej częstotliwości: u góry konwencjonalny z lampami próżniowymi, u dołu - tranzystorowany

Innym godnym uwagi elementem półprzewodnikowym znajdującym zastosowanie w komunikacji mikrofalowej jest dioda o zmiennej pojemności. Pojawienie się tych diod umożliwiło rozwój wzmacniaczy parametrycznych, /nie ona-

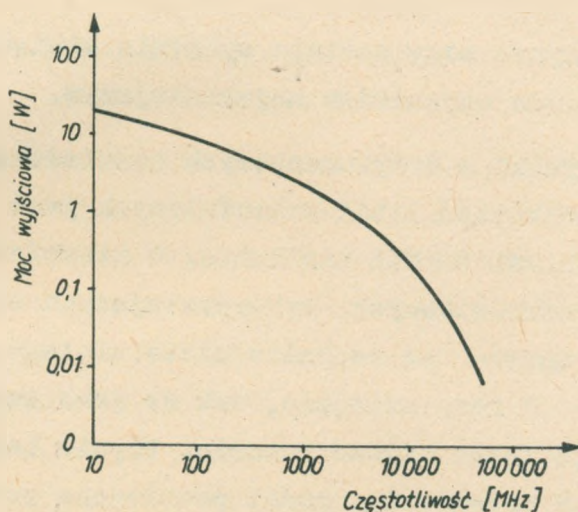
wianych w artykule/. Diody te umożliwiły realizację mikrofalowych źródeł energii, wykorzystujących elementy oparte na technice ciała stałego. Wykorzystanie diod o zmiennej pojemności bardzo wyraźnie poprawia sprawność powielaczy częstotliwości zakresu fal metrowych i decymetrowych. Stosowane obecnie mikrofalowe źródła mocy zawierają: oscylator tranzystorowy, tranzystorowy powielacz częstotliwości, tranzystorowy wzmacniacz o mocy wyjściowej do 10 W w zakresie 100 - 150 MHz oraz układy z diodami o zmiennej pojemności powielające częstotliwość sygnału wzmacniacza do kilku tysięcy MHz. Na rysunku 9 pokazano przykładowo źródło sygnałów mikrofalowych.



Rys. 9. Nadajnik mikrofalowy zbudowany całkowicie z elementów wzmacniających wykorzystujących technikę ciała stałego

zbudowane całkowicie z elementów wzmacniających, wykorzystujących technikę ciała stałego. Rysunek 10 ilustruje

maksymalne osiągalne moce wyjściowe mikrofalowych elementów wzmacniających, wykorzystujących technikę ciała stałego. Już obecnie jest możliwa budowa mikrofalowych



Rys. 10. Powielacze częstotliwości wykorzystujące wyłącznie elementy wzmacniające oparte na technice ciała stałego

stacji przekaźnikowych zawierających wyłącznie elementy wzmacniające, wykorzystujące technikę ciała stałego, chociaż ze względu na ograniczoną obecnie moc nadajnika /poniżej kilkuset miliwatów w zakresie fal decymetrowych/ krotność sygnałów przesyłanych przez takie urządzenia jest ograniczona.

Mikrofalowe stacje przekaźnikowe, wykorzystujące elementy wzmacniające oparte na technice ciała stałego, mają wiele zalet:

1. Znacznie zmniejszone wymiary i ciężar urządzenia.
2. Wymiana lamp próżniowych staje się niepotrzebna, co zmniejsza zarówno ilość przerw, jak i koszty eksploatacji.
3. Zużycie mocy zostaje wybitnie obniżone, co jest niewątpliwie czynnikiem najważniejszym.

Jak wynika z dotychczasowych doświadczeń, więcej niż połowa uszkodzeń linii mikrofalowych jest spowodowana uszkodzeniami źródeł zasilania. W mikrofalowych stacjach przekaźnikowych, wykorzystujących elementy wzmacniające oparte na technice ciała stałego, zużycie mocy jest 3 - 10 razy mniejsze, tak że jako zapasowe źródło zasilania można używać baterię. Użycie baterii znacznie zmniejsza przerwy łączności powodowane przez uszkodzenia źródeł zasilania.

Reasumując - zaletą nowego typu mikrofalowych stacji przekaźnikowych jest wzrost pewności i obniżenie kosztów całej linii.

