

微波通信系統

白光弘 著



中央圖書出版社出版

微波通信系統

白光弘 著

國立台灣大學電機工程學系教授

中央圖書出版社出版

行政院新聞局出版事業登記證
局版台業字第〇九二〇號

微波通信系統
版權所有・翻印必究
實價新臺幣壹佰捌拾元整

編著者：白 光 弘

出版者：中 央 圖 書 出 版 社

台北市重慶南路一段一四一號

發行人：林 在 高

發行所：中 央 圖 書 供 應 社

台北市重慶南路一段一四一號

電話：三三一五七二六

郵政劃撥帳戶：九一四號

印刷所：利 康 印 刷 有 限 公 司

三重市民生東街廿六之一號

中華民國七十二年八月初版

編號：2922

序

近二十年來隨著世界經濟繁榮，交通日趨發達，不論對國內或國際越洋通信之需求量均急劇上昇。這促進了微波電子工學包括微波電晶體、微波電子管、微波體積體電路、微波材料學、導波管、甚至微波天線等各類科技之進展。僅就工作頻率而言，已邁進到毫波米之實用領域外、輸出功率之增高、頻帶寬之擴張、各類極化波之混合應用，以期頻譜再利用，另傳播路徑之伸長、劃頻、劃時各種多工制之配合應用等，使近代微波通信科學展現了空前未有的盛況。晚近，電信、電報、電話、傳真、數據傳輸、電視傳播、廣播皆依賴微波通信方能推進業務，而今尚不敷應用。撇開陸上微波通信網不談，國際及國內衛星通信系統、太空衛星通信系統、民用及軍用各類雷達系統、越地平通信系統等，均依賴微波通信才能達成其目的。此外，工業加工用微波能之應用、醫療用微波儀器、甚至家庭用微波烤箱等亦是微波之應用，其應用之廣實不勝枚舉。

民國六十八年起，應聘在國防部電訊發展室為軍官團講授微波通信系統一課，而後於民國七十一年五月付梓。此次承蒙電訊發展室之同意，並得中央圖書出版社協助再版。本書適用大專院校之電機、電子科課本，或供從業微波通信技術人員參考用。書中倘有錯誤疏漏處敬請指教為幸。

於國立台灣大學工學院電波研究室

白 光 弘 謹啓

民國七十二年七月

微波通信系統目錄

第一章 微波通信系統概論.....	1
1-1 系統概論.....	1
1-2 陸上視線距離微波通信系統之優點.....	2
1-3 通信頻率.....	2
1-4 視線距離微波傳播系統概略.....	7
1-5 多工制之調變技術.....	12
1-6 微波天線、導波管及相關設施.....	12
1-7 電波傳播衰落特性及通信系統可靠度.....	22
第二章 視線距離內微波電波之傳播.....	29
2-1 自由空間內電波傳播公式.....	29
2-2 兩個等向天線間之傳播路程損失.....	30
2-3 天線增益及半功率波束角度.....	33
2-4 地球大氣層內電波傳播.....	42
2-5 地球鼓起及夫累涅帶.....	52
2-6 有效等向幅射電功率.....	64
2-7 轉播系統內載波頻率之排列及頻率岔移.....	64
2-8 CCIR/CCITT 2500 公里假設傳播路徑.....	71
2-9 潛望鏡式天線系統.....	76
2-10 潛望鏡式天線系統之計算實例.....	80
第三章 導波管.....	85
3-1 導波管概論.....	85

3-2	橫磁波型態傳播	87
3-3	橫電波型態傳播	94
3-4	導波管內電磁波之衰減	101
3-5	導波管之最大電功率規格	106
3-6	導波管之波阻抗比	111
第四章	微波通信系統之雜音	116
4-1	熱雜音	116
4-2	雜音指數 (NOISE FIGURE)	117
4-3	天線有效溫度	121
4-4	串級放大器之雜音溫度與雜音指數	126
第五章	微波傳播路程之計算實例	135
5-1	自由空間傳播 (FREE SPACE PROPAGATION)	
5-2	傳播路徑內有障礙物存在 (PROPAGATION OVER AN ISOLATED OBSTACLES)	139
5-3	海上傳播 (PROPAGATION OVER THE SEA), 及分集接收法 (DIVERSITY RECEPTION)	145
5-4	電波傳播斷路或然率計算法	152
5-5	長距離海上傳播	155
第六章	越地平微波通信系統	166
6-1	越地平通信系統概略	166
6-2	越地平通信原理	168
6-3	越地平微波通信系統之優缺點	172
6-4	越地平微波傳播路徑損失計算法	172
6-5	散射角度 (θ) 之計算法	177
6-6	天線與傳播媒質偶合損失	179
6-7	典型越地平通信系統之設計	180
6-8	分集接收法	187

第七章 微波通信用反射板之諸特性與其應用	196
7-1 微波無源反射板之增益	196
7-2 微波反射板之增益計算法	199
7-3 反射板計算例題	204
7-4 反射板方向 (BEARING) 有效面積 (EFFECTIVE AREA) 及極化偏移 (POLARIZATION SHIFT)	214
7-5 微波反射板應用於空間分集接收法	219
7-6 使用微波反射板時應留意事項	220
第八章 毫米電波之傳播	223
8-1 毫米電波傳播概略	223
8-2 毫米電波傳播特性	223
8-3 因降雨而產生衰減 (RAIN ATTENUATION)	227
8-4 毫米電波傳播計算例	227
8-5 毫米電波通信系統之優缺點	232
8-6 毫米電波傳輸系統概括	234
第九章 電場強度與功率密度	238
9-1 電場強度基本理論	238
9-2 測試單位	239
9-3 自由空間之衰減	241
9-4 接收功率與電場強度之換算	243
結 語	247
參考文獻	247
附 錄	249

第一章 微波通信系統概論

1-1 系統概論

現代的微波通信可分為下列二系統：其一為視線距離內通信系統（LINE OF SIGHT SYSTEM：LOS SYSTEM），另一為越地平通信系統（OVER THE HORIZEN SYSTEM：OH SYSTEM）。通常陸上的視線距離微波通信系統（TERRESTRIAL M/W COMMUNICATION SYSTEM）是應用較小發射功率配合定向高增益微波天線而每隔 10 ~ 50 英里（16 ~ 80 KM）之距離就設置一轉播站（RELAY STATION）以達成通信目的。特別要留意的就是衛星通信（SATELLITE COMMUNICATION）雖然它的通信距離長達 36,000 ~ 40,000 公里，但因在太空中其傳播路線無障礙物存在仍屬於視線距離通信系統。越地平微波通信系統，顧名思義不在視線距離內，換言之接收地點設在地平線下的遠地點，其有效通信距離通常約 100 ~ 700 公里，故常採用高電功率發射機（高達 50 ~ 100 KW）並應用巨型拋物線天線，再配合所謂空間分集接收（SPACE DIVERSITY RECEPTION）或頻率分集接收（FREQUENCY DIVERSITY RECEPTION）等技術以克服通信之困難。視線距離微波傳播路程之長短因國土之大小而相異。例如本省環島微波通信路程約有 600 ~ 800 公里長，美國東西兩岸有 4,000 多公里，而在加拿大西岸至太平洋兩岸間有 6,000 多公里之傳播路程。

1-2 陸上視線距離微波通信系統之優點

陸上微波通信系統之優點有下列幾種：

(A)通信容量有伸縮性：少至12波道，多至幾百幾千波道包括幾個電視波道在內。

(註) 一個電視波道其頻帶寬(BANDWIDTH)大約佔960電話波道之寬度。

(B)當建設微波傳播路線時，所需時間比同軸電纜通信系統較短並且受地形或障礙物之影響較少。

(C)如果是移動性通信系統，無論軍用或商用其通信裝置之架設比較方便，且其通信效率亦相當高。

1-3 通信頻率

根據1959年日內瓦國際會議，點對點微波通信系統常用之頻率被規定在335—420MHz, 1700—2300MHz, 3400—4200MHz, 5928—8500MHz, 及10500—13250MHz之頻帶內。現為明瞭起見將電磁波之頻率，波長與其名稱列於第1-1表，再從第1-1表中將微波領域有關頻譜抽出列於第1-2表。

(註) 通常頻率300—3000MHz(波長100—10cm)之電波稱為UHF, 而3—30GHz(波長10—1cm)之電波稱為SHF, 或厘米波(CENTI-METER WAVE)而30—300GHz(波長10—1mm)稱為EHF或毫米波(MILLI-METER WAVE)。

晚近陸上常用的微波頻率範圍均在2-12GHz內。第1-3表與第1-4表是美國採用的微波頻譜表。

電磁波頻譜

範圍	波長 (cm)		頻率 (GHz)		備註
	最大	最小	最高	最低	
無線電	Infinite	0.1	D.C.	300	VLF/LF/MF/ HF/VHF/UHF/SHF/Exp.
紅外線	0.1	0.00008	300	375,000	Heat & Black Light
可視光線	0.00008	0.000038	375,000	790,000	Starts with Red, progresses through orange, yellow, green, blue, and violet
紫外線	0.000038	0.0000012	790,000	22,500,000	Chemical and invisible
X 光線	0.0000012	0.0000000006	22,500,000	45,000,000,000	
伽瑪線	0.000000014	0.0000000001	45,000,000,000	270,000,000,000	Radioactivity
宇宙線	0.0000000001	Indefinite	270,000,000,000	Indefinite	Little known

波長 (m)	頻帶	波長每一 米變化時 KHz 數	頻率每一 KHz 變 化時米數	FCC 頻帶略稱
特長波 (infinity to 10,000)	0 to 30 KHz/sec	Below 0.01	Over 333	Very low (VLF)
長波 (10,000 to 1000)	30 to 300 KHz/sec	0.05	20	Low (LF)
中波 (1000 to 100)	300 to 3000 KHz/sec	5	0.2	Medium (MF)
短波 (100 to 10)	3 to 30 MHz/sec	500	0.002	High (HF)
特短波 (10 to 1)	30 to 300 MHz/sec	5×10^4	0.2×10^{-4}	Very high (VHF)
超短波 (1 to 0.1) (microwaves)	0.3 to 3 GHz/sec	5×10^6	0.2×10^{-6}	Ultra high (UHF)
極短波 (10 to 1 cm) (microwaves)	3 to 30 GHz/sec	5×10^8	0.2×10^{-8}	Super high (SHF)
至短波 (10 to 1 mm) (millimeter waves)	30 to 300 GHz/sec	5×10^{10}	0.2×10^{-10}	Extremely high (EHF)
筆光波 (1 to 0.1 mm)	300 to 3000 GHz/sec	5×10^{12}	0.2×10^{-12}	

第 1 - 1 表 電磁波之頻率、波長與名稱圖表

微波頻帶

Band	Frequency Region (GHz)	Band	Frequency Region (GHz)
UHF	0.3-1.12	K	18.0-26.5
L	1.12-1.7	Ka	26.5-40.0
LS	1.7-2.6	Q	33.0-50.0
S	2.6-3.95	U	40.0-60.0
C	3.95-5.85	M	50.0-75.0
KC	5.85-8.2	E	60.0-90.0
X	8.2-12.4	F	90.0-140.0
Ku	12.4-18.0	G	140.0-220.0
		R	220.0-325.0

第 1 - 2 表(a) 常用微波頻譜表

美軍微波頻帶略稱

Band	Frequency Region (GHz)	Band	Frequency Region (GHz)
A	0.1-0.25	H	6.0-8.0
B	0.25-0.5	I	8.0-10.0
C	0.5-1.0	J	10.0-20.0
D	1.0-2.0	K	20.0-40.0
E	2.0-3.0	L	40.0-60.0
F	3.0-4.0	M	60.0-100.0
G	4.0-6.0		

第 1 - 2 表(b) 美軍通用微波頻譜表

美國共同載波通信用微波頻帶

BAND NAME	RANGE GHz	CENTER FREQ GHz	ATT'N IN dB AT 1.0 MILE	COMMENTS OR EMISSION LIMITATION
2 GHz	2.11 - 2.13 & 2.16 - 2.18	2.145	103.2	3500F9 †††
4 GHz	3.70 - 4.20	3.950	108.5	20,000F9 †
6 GHz	5.925 - 6.425	6.175	112.4	30,000F9 ††
11 GHz	10.7 - 11.7	11.20	117.6	50,000F9
† Shared with Satellite-to-Earth †† Shared with Earth-to-Satellite ††† 2.11 to 2.12 shared with space telecommand transmit				

美國地方政府及私人企業機構用微波頻帶

BAND NAME	RANGE GHz	CENTER FREQ GHz	ATT'N IN dB AT 1.0 MILE	COMMENTS OR EMISSION LIMITATION
2 GHz	1.85 - 1.99	1.920	102.3	8,000F9
	2.13 - 2.15 & 2.18 - 2.20	2.165	103.3	800F9
	2.45 - 2.50	2.475	104.5	Shared
6 GHz	6.575 - 6.875	6.725	113.1	10,000F9
12 GHz	12.2 - 12.7	12.450	118.5	20,000F9

美國電視輔助用微波頻帶

BAND NAME	RANGE GHz	CENTER FREQ GHz	ATT'N IN dB AT 1.0 MILE	COMMENTS OR EMISSION LIMITATION
2 GHz	1.99 - 2.11	2.050	102.8	STL, etc.
7 GHz	6.875 - 7.125	7.000	113.5	STL, etc.
12 GHz	12.7 - 13.25	12.975	118.9	STL, etc.
	12.7 - 12.95	12.825	118.8	CARS †
† Comm. Antenna Relay Service				

第 1 - 3 表 美國 FCC 規定之微波載波表

美國聯邦政府微波頻帶範圍

BAND NAME	RANGE GHz	CENTER FREQ GHz	ATT'N IN dB AT 1.0 MILE
2 GHz	1.71 - 1.85	1.780	101.6
	2.20 - 2.29	2.245	103.6
4 GHz	4.40 - 5.00	4.700	110.0
7-8 GHz	7.125 - 8.40 †	7.750	114.4
14 GHz	14.40 - 15.25	14.625	120.0
† 7.25 - 7.30 GHz reserved for Satellite-to-Earth 7.975 - 8.025 GHz reserved for Earth-to-Satellite			

CCIR 推薦微波頻帶號碼 (OSLO-1966)

REC. NO.	RANGE GHz	CENTER FREQ GHz	ATT'N IN dB AT 1.0 MILE	CAPACITY CHANNELS
283-1	1.7 - 1.9	1.808	101.7	60 & 120
	1.9 - 2.1	2.000	102.6	
	2.1 - 2.3	2.203	103.5	
382-1 or (279-1)	1.7 - 2.1	1.903	102.2	600 to 1800 or (300)
	1.9 - 2.3	2.101	103.0	
	3.8 - 4.2 †	4.0035	108.6	
	3.7 - 4.2 *†	3.950	108.5	
383-1	5.925 - 6.525 ††	6.175	112.4	1800 or equiv.
384-1	6.43 - 7.11	6.770	113.2	2700 or equiv.
385	7.125 - 7.425 **	7.275	113.8	60, 120, 300
	7.250 - 7.550 **	7.400	114.0	
	7.425 - 7.725	7.575	114.2	
	7.550 - 7.850	7.700	114.3	
386-1	8.200 - 8.500	8.350	115.0	960
	7.725 - 8.275 **	8.000	114.7	1800
387	10.7 - 11.7	11.200	117.6	960
† Shared with Satellite-to-Earth †† Shared with Earth-to-Satellite * Alternate for U.S.A. ** 7.250 - 7.300 GHz Reserved for Satellite-to-Earth 7.975 - 8.025 GHz Reserved for Earth-to-Satellite				

第1-4表 CCIR 推薦的微波頻譜與其號碼

1-4 視線距離微波傳播系統概略

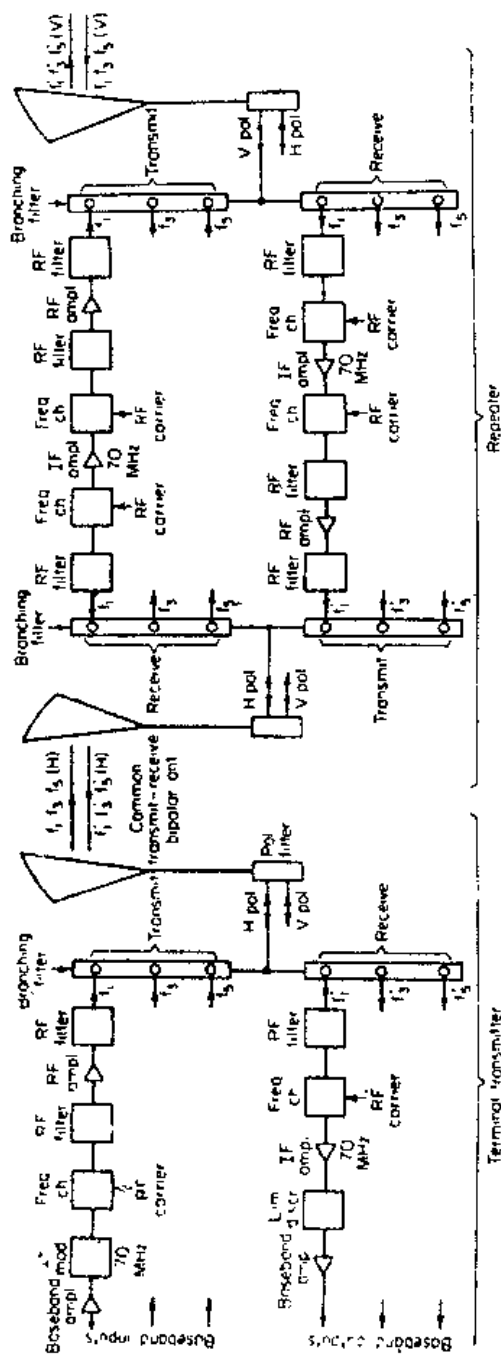
電話或電視信號之長距離微波通信傳播系統，其傳播特性與系統之雜音 (NOISE)，增益 (GAIN)，穩定性 (STABILITY)，頻帶寬 (BANDWIDTH)，放大器直線性 (AMPLIFIER LINEARITY)，波形失真 (WAVEFORM DISTORTION) 等頗有密切關係。這些因素又與發射機輸出電功率，天線尺寸，接收機之雜音指數 (NOISE FIGURE) 有決定性之關聯。第 1-1 圖是微波傳播系統概略圖。兩終端站 (TERMINAL STATIONS) 間設置一個或幾拾個轉播站 (REPEATER STATION)。每一個轉播站之間隔約為 50KM。(這距離因地形而異)。發射終端站輸入之基準頻帶 (BASE BAND) 信號是音頻 (VOICE FREQUENCY) 或電視信號等經過調變 (MODULATION)，多工 (MULTIPLEXING) 再放大電功率後，應用定向天線將調變電波輻射至下一個轉播站。在轉播站將接收到的微波載波頻率，更換另一載波頻率並放大後再向下一個轉播站發射出去。如此逐次轉播到最後的接收終端站 (TERMINAL STATION)。在接收終端站將接收到的電波經接收機復調 (檢波) 並放大後可取出原先之基準頻帶信號。

通用之轉發器 (REPEATER) 依它的功能可分為二類：

(A) 基準頻帶式轉發器 (BASE-BAND REPEATER)

本型式在轉播站最適合於基頻帶信號之降取 (DROPPING) 及介入 (INSERTION)。第 1-2 圖是本式轉發器方塊圖。如圖所示由線路進來的信號進入預先放大器 (PRE-AMP)，預先加強 (PRE-EMPHASIS)，調頻 (FM-MOD)，順通器 (CIRCULATOR) 及射頻支路 (RF BRANCH CIRCUIT) 後經導波管 (WAVE GUIDE) 傳輸到發射天線。相反的由天

第1-1圖 微波傳播系統概略圖



線進來的調頻波經導波管送至順通器，通頻帶濾波器 (BAND-PASS FILTER: BPF)，混波器 (CONVERTER)，中頻放大器 (IF-AMP)，限制器 (LIMITER)，復調器 (DEMODULATOR)，解強器 (DE-EMPHASIS) 後將音頻信號取出。圖中發射機 (Tx) 接收機 (Rx) 各裝設二部以防機器故障時做備用 (STAND-BY)。本型式轉發器在轉播站可復調 (檢波) 以得音頻信號，另可介入其他音頻信號，但就系統性質而言，比較容易發生失真 (DISTORTION) 故不太適合於長距離信號之傳輸。

(B) 外差式轉發器 (HETERODYNE REPEATER)

本型式轉發器通常在傳播站內不復調又不介入其他音頻或視頻信號，因此失真機會比基準頻帶式轉發器較少，而適合於長距離微波轉播系統。第 1-3 圖是本系統方塊圖。如圖所示來自接收天線調頻波經順通器，通頻帶濾波器、降頻混波器 (DOWN CONVERTER)，中頻放大器，另附設自動增益控制器 (AUTOMATIC GAIN CONTROL: AGC)。此後再經昇頻混合波 (UP CONVERTER)，濾波器、順通器、射頻放大器、導波管將調頻電波送至發射天線。此外為了降頻及昇頻混波器之適當作用，轉發器內裝設降頻用局部振盪器 (Rx. Lo) 及昇頻用局部振盪器 (Tx. Lo)。

上面已講過每一轉播站之間隔約為 50 KM。美國東西兩岸距離假設 4000 公里，就需要八十幾個轉播站；而如本省北部至南部以 300 公里計算需設立約六個轉播站方可。現假如自發射終端站至最後接收終端站中途經幾個 (或幾拾個) 轉播站均採用同一微波載波頻率的話，必定發生干擾 (INTERFERENCE)，串話 (CROSS TALK) 或越過傳遞 (OVER REACH) 等不良現象。為避免這些干擾現象通常每一轉

TR-2G060/120/300/ 600/960

TYPE

TR-2G060
TR-2G0120
TR-2G0300
TR-2G0600
TR-2G0960

DIMENSIONS
(for two Transmitter
Receivers)

WEIGHT

COAXIAL CONNECTOR

Specifications

OUTPUT POWER of Transmitter

NOISE FIGURE of Receiver

LOCAL FREQUENCY STABILITY

AMPLITUDE/FREQUENCY RESPONSE

POWER CONSUMPTION

(per one Transmitter Receiver)

1.5W nominal (10W available with TWT Amplifier)

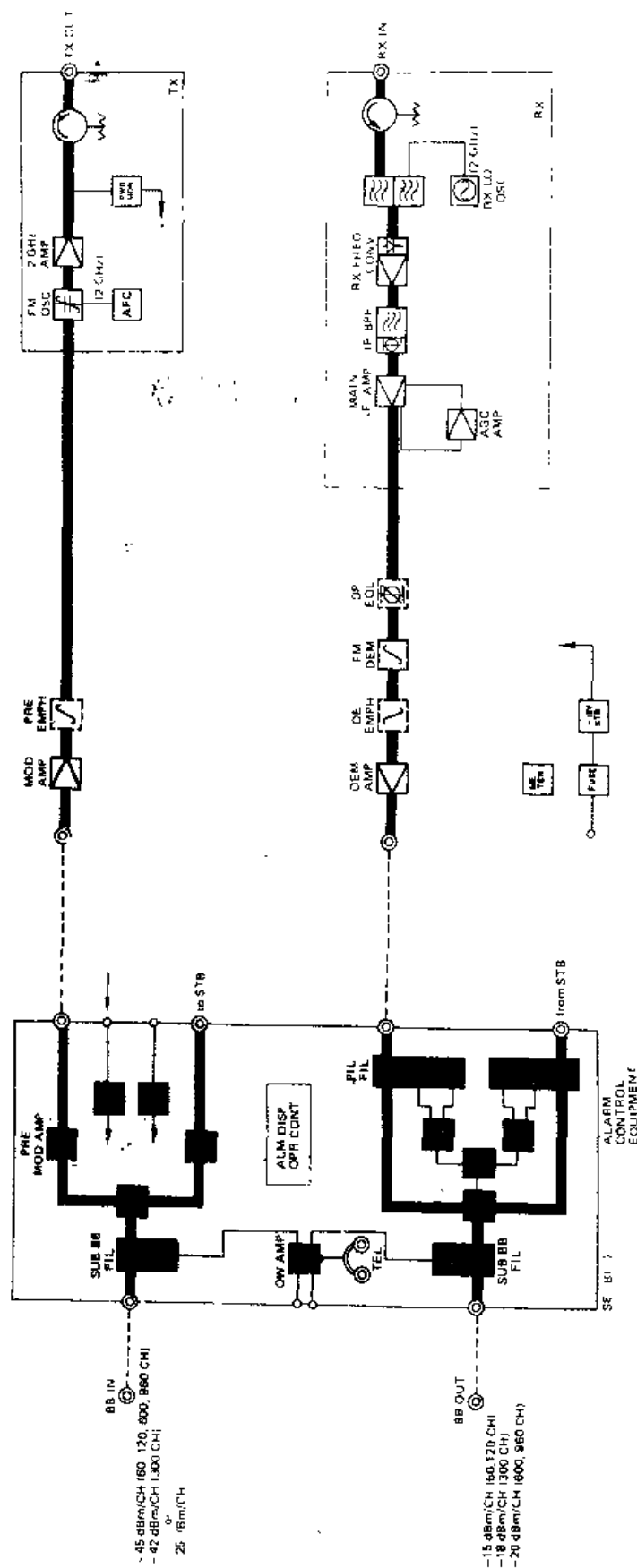
Less than 7 dB

Within $\pm 1 \times 10^{-4}$

Within ± 0.5 dB

Approx. 35W 1-24V DC (for up to 300 CH)

45W 1-24V DC (for 600 or 960 CH)



第 1-2 圖 微波傳播系統基準頻帶式轉發器方塊圖