社団法人 電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
TECHNICAL REPORT OF IEICE
SPS2003-03(2004-02)

［招待論文］衛星搭載用 TWTA における性能向上と開発動向

片上 勘次

NEC 東芝スペースシステム株式会社 宇宙機器本部

〒1224-8555 神奈川県横浜市都筑区池辺町 4035 番地
E-mail: katakami.kanji@ntspace.jp

あらまし TWTA は衛星搭載用中継器の中核機器であり、1980 年代半ばから 2000 年ころにかけて性能および信頼性が著しく向上した。今後の衛星システム検討に資するため、従来注力されてきた、高効率化、高出力化、小型軽量化、長寿命高信頼性化の過程と現在の状況を整理するとともに、最近の開発動向を概観した。その結果、従来行われてきた性能改善はほぼ一段落した感があり、MPM（Microwave Power Module）開発、線形性の改善、MPA（Multi Port Amp）用 TWTA やフェイズドアレイアンテナ用 TWTA の開発など、TWTA の用途の拡大を目指した開発に重点が移りつつあると言えよう。

キーワード 衛星, TWT, EPC, TWTA

Review of Performance Improvement and Development Trends of Space TWTA

Kanji KATAKAMI

Space Subsystem& Equipment Division, NEC TOSHIBA Space Systems, Ltd.

4035 Ikebe-cho, Tsuzuki-ku, Yokohama, 224-8555 Japan
E-mail: katakami.kanji@ntspace.jp

Abstract Space TWTA is a key component in satellite transponder and its performance and reliability were improved significantly from the middle 1980s to 2000. For future space system design, improvement trends and status in efficiency, output power, size, mass, life and reliability which were intensively worked on are reviewed. And current development trend are also reviewed. The review shows the works have come to first end and new trends shift to the developments such as MPM (Microwave Power Module), TWTA for MPA (Multi Port Amp), TWTA for Phased Array Antenna, TWT with high linearity, which may open new applications.

Keyword Satellite, Space, TWT, EPC, TWTA

1. はじめに

TWTA（Traveling Wave Tube Amplifier、進行波管増幅器）は電力増幅器であり、SSPA (Solid State Power Amplifier、固体電力増幅器)と同様に地上マイクロ波通信装置、衛星通信地球局、衛星搭載中継器等に広く用いられている。

衛星搭載中継器用増幅器においては、高い出力のものが求められるようになり、TWTA は SSPA に比べ高出力が得られることから１９８０年代半ばより活発に研究開発が行われ、効率などの性能や信頼性が大幅に改善された。この結果、TWTA は衛星中継器の中核機器となり、衛星搭載用電力増幅器の 90%以上に TWTA が用いられ、TWT で見れば年間 1000～2000 本の TWT が出荷されていると推定されている（2001 年時点）[1]。

最近はピーク時ほどの旺盛な需要はなくなっていると予想されるが、新たな可能性を求めて従来とは違った性能改善も行われているようである。

そこで、従来行われてきた性能や信頼性の改善状況をまとめるとともに、最近の研究開発の動向を概観することにより、今後の衛星システムの検討に資することとしたい。

2. 衛星搭載用 TWTA とは

TWTA は TWT とそれを動作させるための電源（Electronic Power Conditioner, EPC）からなる。TWT は電子管の一種で、ヘリックスと電子ビームの相互作用を利用して RF 信号を増幅している。動作周波数も L 帯（1.5GHz）から、V 帯（60GHz 帯）まで、広域に渡る。EPC は TWT を動作させるため高電圧を供給する。TWTA の主な特徴は、高出力、高効率である。

写真 1 に TWTA の例として、Ku 帯 120W　TWTA の　写真を示す。

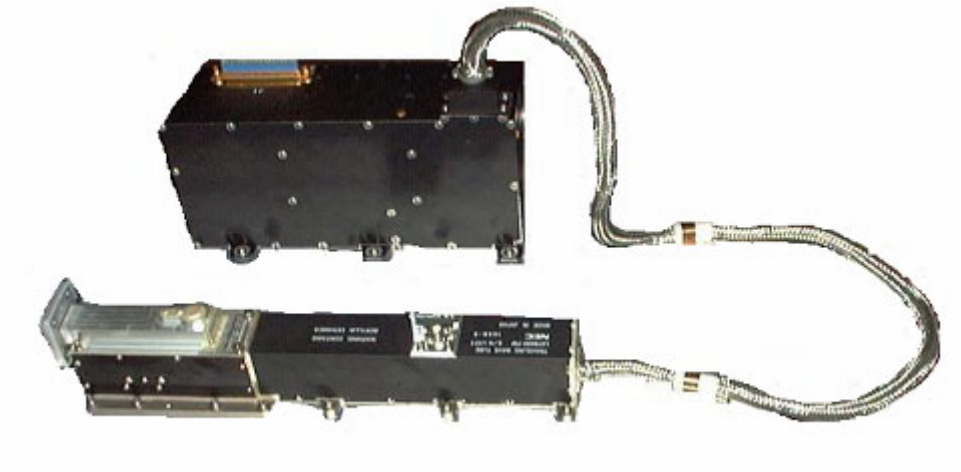

写真 1 Ku-Band 120W 衛星搭載用 TWTA

3. 製造実績のあるメーカ

衛星搭載用 TWT と EPC は、衛星という特殊な環境で使用されるために高度な設計技術と品質管理技術を必要とする。このため衛星搭載用 TWT と EPC の製造実績のあるメーカは少ない。製造実績のある主要メーカを表 1 に示す。これらのメーカは合併、分社化で、発表した当時と社名が変わっているものがあるので、過去の社名も示しておく。なお、TWTA は通常 EPC メーカが EPC と TWT を組み合わせることにより作られる。

表 1
衛星搭載用 TWT/EPC の製造実績のある主要メーカ

	メーカ	社名の変遷	国
EPC/TWTA	TESAT (ﾃｻｯﾄ)	ANT→BOSCH→TESAT	独
	Boeing (ﾎﾞｰｲﾝｸﾞ)	Hughes→Boeing (ﾋｭｰｽﾞ)	米
	NTSpace (NEC 東芝ｽﾍﾟｰｽｼｽﾃﾑ)	NEC→NTSpace	日
	ALCATEL　ETCA (ｱﾙｶﾃﾙ ｴﾄｶ)	–	ベルギー
TWT	Thales (ﾀﾚｽ)	Thomson AEG Thomson→Thales	仏 独
	Boeing (ﾎﾞｰｲﾝｸﾞ)	Hughes→Boeing (ﾋｭｰｽﾞ)	米
	NEC ﾏｲｸﾛ波管	NEC→NEC ﾏｲｸﾛ波管	日

注　通常 EPC メーカが、TWT と EPC を組み合わせて TWTA として完成させる。

4. 現在までの TWTA 性能改善状況

衛星搭載用 TWTA には特に次のような性能が求められてきた。

（１） 高効率（効率：直流電力から RF 電力への変換効率）
（２） 高出力
（３） 小型、軽量
（４） 長寿命、高信頼性

これらの性能に関して、SSPA との競合および高出力増幅器に対する強い需要から、1980 年代後半から各社で精力的な開発が行われ始め、著しい改善が見られた。ここでは、1980 年ころから現在までの期間を中心に、上記の性能の改善の過程と現在の状況を示す。

4.1 高効率化

TWTA は衛星搭載中継器の中で最も電力を使用する機器であること、高効率化は単に消費電力を低減するためでなく、それに伴い発電機器、排熱機器の搭載重量が減り、打上げ費用が 50,000 ドル/k g [1]と言われている衛星のコストを大きく低減できることから、最も改善に注力されてきた性能である。

図 1 は、TWTA のうち TWT の効率の改善状況を示すものである。図に示している Ku 帯（約 12GH z ）TWT は最も使用され、最も高い効率が得られた帯域の TWT であるが、1973 年には効率が 34%[2]であったものが、各社の激しい競争もあり[2]、2000 年には 70%[3],[4]にまで改善されている。

効率の改善は、電子ビームとヘリックスの相互作用を高め電子ビームエネルギーの RF への変換効率を上げることや、相互作用の終わった電子ビームからのエネルギーの回収を高めることなどにより行われた[5]。

Ku 帯で得られた技術を生かし、他の帯域の TWT でも効率が改善された。現在得られている各帯域におけ

る効率を表 2 に示す。

TWT を動作させるための EPC においても効率の改善がなされた。EPC は、衛星バスから低電圧（100V 以下）で供給される電力を、TWT 動作に必要な高電圧（３～7ｋV）に変換して電力を供給する機能を有する。EPC の効率はこの変換効率を示すもので、EPC に入力される電力の何％が TWT に供給されるかを示す。EPC の効率は、回路のトポロジーの改善などにより高められ[6]、1980 年代初めは 80％台 1997 年には 94％まで達した[7]。

なお、EPC は TWT と異なり、その効率は TWT の動作周波数帯域にあまり依存しない。

TWTA の効率は、TWT と EPC の効率を掛けたものとなるが、両者の効率改善により、TWTA としての効率は図 2 に示すような改善を遂げてきた。1997 年に Ku 帯 TWTA で 62％が得られており[6]、現在では 65％程度得られていると推定される。

TWTA が実際に中継器で使用される場合は、10 年以上の期間わたり、低温（-10℃前後）から高温（+60℃～+85℃）の温度範囲において、帯域内（例えば Ku 帯では約 700MHｚ）のどの周波数でも所定の性能を満たす必要がある。このため、システム設計時には、公表されている TWTA の 4％以上低い効率の消費電力配分で設計されているようである。

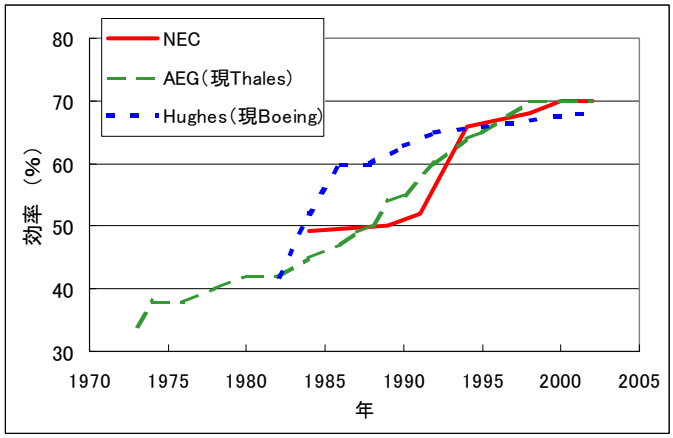

図 1　TWT の効率改善履歴
（文献[2]をベースに作成）

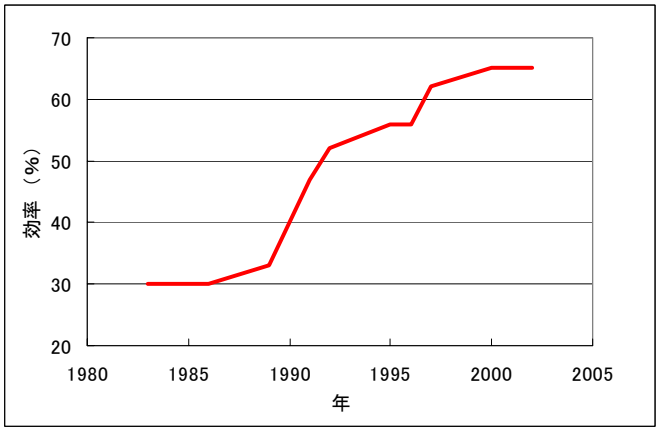

図 2　TWTA 効率改善履歴
（文献[6]をベースに作成）

表 2　現在の衛星搭載用 TWT の効率

周波数帯	周波数/RF 出力	効率	備考
L 帯	1.5GHz/150W	55%	Thales [12]
S 帯	2.5GHz/220W	59%	Thales [12]
	2.5GHz/120W	65%	Boeing [13]
	2.4GHz/140W	63%	NEC [14]
C 帯	4GHz/60W	63%	Thales [15]
	4GHz/100W	68%	Boeing 13]
X 帯	8GHz/100W	68%	Thales [16]
	8GHz/120W	65%	Boeing 13]
Ku 帯	12GHz/120W	70%	Thales [15]
	12GHz/150W	70%	Boeing [13]
	12GHz/120W	70%	NEC [3]
Ka 帯	20GHz/90W	65%	Thales [17]
	20GHz/90W	66%	Boeing [13]
	19GHz/120W	63%	NEC [20]
Q 帯	43GHz/35W	42%	NEC [18]
V 帯	60GHz/15W	25%	Thales [19]

4.2 高出力化

TWTA の高出力化は需要に応じて進められてきたため、必ずしも低い出力から高い電力に向かって開発されてきたわけではない。高出力化のトレンドを振り返ってみるとおおよそ次のようなものであった。

- 1960 年代初め～1990 年ころ　　数 W～20W 程度の TWT の開発
- 1970 年代後半～現在　放送衛星用高出力(100～450W)TWT の開発[10],[11],[12]
- 1990 年ころ～現在　　20W クラスから、高効率化を行いながら徐々に高出力化し現在 150W 程度まで達している。

上記のように、TWT は、中クラス（20W～100W 程度）の出力の TWT に先行して放送用に高出力（100W 以上）TWT が精力的に開発された。

TWT の出力を高めるには、ビーム電流を増やす必要があった。また、高出力に伴い増加する発熱の熱処理能力を上げるも必要があった。前者に対しては、ビーム電流を発生するカソードに、酸化物カソードから含浸型カソードを採用することにより、後者に対しては放熱設計技術の向上により TWT 各部の放熱能力を高めることにより対応してきた。

TWT は出力増加に伴い動作電圧が高くなる。EPC はこれに対応し、最高 12ｋV の高圧を発生するものが開発された[21]。なお、最近の TWT の出力は殆ど 150W 以下であり、TWT の動作電圧は 7ｋV 以下となっている。

表 3 に、現在までに開発が完了（一部推定）した高出力 TWTA を周波数帯域毎に示す。

表 3　高出力 TWTA

周波数帯	周波数	出力	備考（TWT ﾒｰｶ/EPC ﾒｰｶ）
L	1.5GHz	150W	Theles/TESAT
S	2.5GHz	220W	Thales/TESAT
C	4GHz	120W	Thales/TESAT, Boeing/Boeing
X	8GHz	120W	Boeing/Boeing
Ku	12GHz	260W	Thales/TESAT
Ka	21GHz 20GHz	230W* 130W	NEC/NEC Thales/TESAT
Q	44GH z	25W	NEC/NEC

注　*印は結合空洞型 TWT、その他はﾍﾘｯｸｽ型 TWT

4.3 小型、軽量化

TWTA のうち TWT の小型軽量化は、TWT 各部分の構造部品の小型化と熱設計技術の向上により行われた。

前述したように、1990 年ころから市場の要求により、低出力から徐々に高出力化されていった。この過程で、熱設計技術の向上と効率の改善により、出力を上げつつもそれに伴う放熱構造の大型化が抑えられた。その結果、出力が 100W 以上の高出力のもので著しく小型軽量化技術の効果が現れた。

1970 年代後半から 1980 代に放送衛星用に初期の高出力(150W～450W)TWT が開発されたが[8],[9],[10]、TWT のなかで主な熱発生源であるコレクタには、放熱のため輻射冷却構造が採用された。しかし、熱設計技術の向上と効率改善により、Ku 帯 170W 出力でも軽い伝導冷却構造にできるようになった[11]。この小型軽量化の程度を Ku 帯 120W　TWT を例にとって示すと表 4 のようになり、重量で約 1/5 になった。なお、輻射冷却構造の TWT の軽量化も進んだ[3],[15]。

表 4　TWT の小型化の進展の例（Ku 120W TWT）

	1987 年	1996 年
質量	3300 g	680 g
大きさ（長さｘ幅ｘ高さ）	416 x 130 x 140 mm	326 x 62 x 68.5 mm
備考	NEC ［22］	NEC ［23］

TWT の大きさと重量は周波数と出力によって異なる。周波数が低くなると波長が長くなること、出力が高くなると放熱部が大きくなることから、一般的に動作周波数が低いほど、出力が高くなるほど TWT は大きくなり、重量も重くなる。現在の TWT の大きさ、重量を使用周波数帯、出力とともに表 5 に示す。

20W 以下の低出力クラスの TWT に付いては、需要が少なかったため、高出力クラス、中出力クラスの TWT に比べ小型軽量化の開発はあまり行われなかった。しかし、最近フェイズドアレイアンテナ用に Ka 帯で出力 10W 程度の超小型 TWT の開発が進められており、長さ 300mm 幅 15.3mm 高さ 20mm、質量 274g の TWT が試作されている[47]。

EPC については、部品の小型化、立体実装を表面実装にするなどの実装技術の向上により小型軽量化が行われてきた。また、1 台の EPC で 2 本の TWT を動作することにより、EPC の重量を低減することも行われた。1 台 1350ｇの EPC は 2 台分で 2700ｇになるが、2 本の TWT を動作させることが出来る EPC は 1900ｇになり、実質的に 800ｇの軽量化になるとしている。ただし、ON している 2 本の TWT のうち片側だけを OFF 出来ず、片側のみ ON したい場合は、2 本 OFF 状態から 1 本のみ ON する必要があるなどの運用上の制約はある。

小型軽量化の進展を、NEC（現 NTSpace）を例に示すと表 6 のようになる。重量で約 1/3 になっている。

現在の実用化されている小型 EPC の大きさ、重量を表 7 に示す。

表 5　現在の TWT の大きさと質量

周波数帯	出力 (W)	大きさ (長さ x 幅 x 高さ) (mm)	占有スペース（注 1) (cm^3)	質量 (g)	備考
L	150	634 x 46 x 57（注 4)	1662（注 4)	2200	Thales [12]
S	220	512 x 43 x 44（注 4)	969（注 4)	1500	Thales [12]
	80 120	429 x 71 x 71 429 x 76 x 76	2162 2478	1150 1200	Boeing [13]
	140	550 x 105 x 105（輻射冷却型）	6063（注 2)	1800	NEC [14]
C	60 130	* 400 x 38 x 36（注 4)	* 547（注 4)	700 800	Thales [12],[15]
	70	368 x 79 x 69	2006	800	Boeing [13]
X	80 120	337 x 62 x 59 371 x 76 x 56	1233 1579	750 900	Boeing [13]
Ku	120 105	* *（輻射冷却型）	* -	800 1150	Thales [6]
	75 125 125	311 x 82 x 64 311 x 82 x 64 419 x 141 x 75（輻射冷却型）	1632 1632 4431（注 2)	725 785 980	Boeing [13]
	120	326 x 62 x 68.5	1385	680	NEC [23]
Ka	30 90 140	* * *	* * *	700 720 750	Thales [17]
	50 150	331 x 69 x 73 303 x 70 x 69	1667 1463	780 850	Boeing [13]
	35 120	298 x 64 x 51 325 x 85 x 63	973 1740	610 910	NEC [20]

注１：取り付け足部、コネクタ部を含めた外形寸法より求めた体積。必ずしも TWT の体積と一致しないが、実装時にどの程度のスペースを必要とする目安となる。

注２：輻射冷却型の場合は、輻射放熱部（コレクタ部）が衛星外に出るため、必要とするスペースとは一致しない。

注３：*はデータ不明

注４：取り付け足部、RF コネクタ部を含ない大きさ

表 6　EPC の小型化の進展の例　(Ku　120W　TWT 用 EPC)

	1989 年	1998 年
質量	5600 g	1750 g
大きさ（長さ x 幅 x 高さ）	320 x 152 x 130mm	240 x 71 x 110mm
備考	NEC [32]	NEC [29]

表 7　現在の小型 EPC の大きさと質量

用途	使用される TWT の RF 出力 (EPC の電力容量の目安)	大きさ (長さ x 幅 x 高さ) (mm)	占有ｽﾍﾟｰｽ (cm^3)	質量 (g)	備考
中電力用	75W	186 x 62 x 85	980	1000	TESAT [44]
大電力用	150W	198 x 66 x 110	1437	1350	TESAT [44]
	220W	191 x 60 x 95	1089	1150	Boeing [46]
	150W	240 x 71 x 110	1874	1750	NTSpace [29]
	220W	250 x 84 x 105	2205	1350	ALCATEL [45]
Dual 動作用	150W x ２本	250 x 70 x 110	1925	1800	TESAT [44]
	220W x ２本	296 x 80 x 104	2463	2200	Boeing [46]

4.4 長寿命化、高信頼性化

寿命と信頼性も著しく改善されたTWTAの性能の一つである。特に TWT は半導体に比べ信頼性が低いとされたため、種々の努力がなされた[30],[31],[32],[48]。その結果、TWTA の採用にあたり、その信頼性は問題になることはなくなった。

TWT には、電子を放出するためのカソードが使われているが、ヒータで加熱されて使用されるため使用材料の蒸発による寿命が懸念された。当初の TWT に使われていた酸化物カソードが TWT 内の残留ガスの影響を受けやすく不具合も多かったため、その後採用された含浸型カソードについて、寿命予測の研究が活発に行われた[33],[34],[35]。その結果、含浸型カソードは安定で長寿命であることがわかった。現在では、通常用いられる 1.2 A/cm２以下の電子放出密度で約 30 万時間（約 34 年）以上の寿命を持ち、実用上 TWT の寿命を制約するものではないことが分かっている。

TWT は高電圧で動作するため、TWT、EPC とも放電の問題があった[36]。これについても精力的に研究が行われ[37],[38]、構造、部品形状の改善、部品の表面を平滑度の改善、清浄度の改善などにより、放電の不具合も殆ど無くなった。

軌道上の動作状態については報告が少ないが、日本の BS-3 では非常に安定した動作が得られたとの報告がある[43]。

TWTA の故障率については、1993 年の時点で TWTA が 680fit であり SSPA の 790fit より低いとの報告がある[39]。その後の良好な使用実績からみて、TWTA、SSPA とも故障率は下がっていると予想され、現在 TWTA、SSPA とも信頼性が懸念される機器との認識は持たれていない。

5. 現在の開発状況と動向

今まで改善に注力されてきた性能に対する開発状況と、最近見られる新しい開発活動から TWTA の動向を概観してみる。

5.1 改善に注力されてきた性能における開発状況

まず、4.2 項で振り返った TWTA の性能に対しての開発状況は以下のようになっている。

（１）高効率化

高効率化の研究は継続されて行われているが、1999 年ごろに Ku 帯 TWT で 70%効率を達成されて以来停滞ぎみである。EPC の効率も 94%達成後伸びていない。今後、技術的なブレイクスルーが必要と思われる。

（２）高出力化

活発ではないが、高出力(Ka 帯 200W、Ku 帯 300W）の開発が行われており[40]、それに対応する高電圧／大容量の EPC の開発も行われていると推定される。

（３）小型軽量化

地上用 TWTA では、EPC、TWT、SSPA が一体になった MPM（Microwave Power Module）が 1991 年ごろから開発されている[24]。これは、SSPA で利得を得て TWT で電力増幅を行うもので主にレーダ用に開発されているが[25],[26],[27][50]、通信用として開発されているものもある[28]。MPM の諸元の一例を表 8 に示す。

衛星搭載用 TWTA においても同様の開発が行われている。TWTA の前段に使われる機器で、RF 信号を所定のレベルまで増幅する固体増幅器（CAMP、Channel Amplifier)、線形性を補償するリニアライザという機器があるが、これらを EPC と一体化し、実質的に中継器の軽量化を図る開発が行われ、一部では実用化されている[41]。これは、地上用 MPM の搭載版とも言えるが、地上用 MPM のように、TWT も含めた一体化はされていない。

（４）長寿命化、高信頼性化

寿命、信頼性に付いては、ほぼ満足するレベルに達しており、カソードの寿命試験は継続して行われているようであるが特に新しい研究、開発の動きは見られない。

表 8　MPM 諸元の例

周波数 (GHz)	出力 (W)	効率 (%)	入力電圧 (V)	消費電力 (W)	大きさ (長さ x 幅 x 高さ) (mm)	容積 (cm^3)	質量 (g)	備考
6-18	100	30	270	350	152.4 x 101.6 x 8.13	126	544	Nothrop Grumman [24]

5.2 最近の新しい開発活動

最近の新しい動きとしては、次のような開発が見られる。

（１）MPM

前項でも述べたが、搭載用 TWTA でも MPM 化の動きが見られる[47]。

TWTA は SSPA に比べ線形性が劣る。これを改善するためにリニアライザが用いられるが、これを小型軽量化し EPC と一体化しようとするものである。

（２）線形性改善

TWT そのものの線形性改善を改善しようとする動きが見られる[42]。

（３）新用途

Multi Port Amp に TWTA を用いる試みが日本、ヨーロッパで行われている。

また、フェイズドアレイアンテナ用を目指した TWT も開発が行われている。フェイズドアレイアンテナ用 TWT は地上用としては開発されていたが、衛星搭載用でも開発が始められた[47]。この開発では、放送衛星用のアレイ増幅器として Ka 帯で出力 10W 程度の超小型 TWT を目指しており、その見通しが得られつつある。

5.3 動向

以上の状況を見ると、従来行われてきた性能改善は一段落した感があり、TWTA の用途を広げるための開発に重点が移りつつあると言えそうである。

6. まとめ

TWTA は、1980 年代半ばから 2000 年ころにかけて、高効率、高出力、小型、軽量、長寿命、高信頼性を目指し精力的な開発が行われ、著しい改善が見られた。これらの性能の改善過程と現状の性能を整理するとともに、最近の新しい開発活動の動向を概観した。

その結果、TWTA の動向としては、これらの性能改善はほぼ一段落した感があり、MPM（Microwave Power Module）開発、線形性の改善、MPA（Multi Port Amp）用 TWTA やフェイズドアレイ用 TWTA の開発など、TWTA の用途の拡大を目指した開発に重点が移りつつあると言えよう。

文　献

[1] G. Fleury, “Space TWTs headed for solid growth,” 2nd IEEE International Vacuum Electronics Conference IVEC2001, Apr. 2001.

[2] G. K. Kornfeld, “Tracking Trends in Satellite TWT Performance,” Microwaves & RF, pp.111-116, Dec. 1995.

[3] T. Ishihara,T. Konishi, M. Yoshida, K. Katakami and S. Hamada, “Ku-Band Radiation Cooled TWT,” AIAA-2000-1162, pp.626-931, Apr. 2000.

[4] E. Bosch, PY Cabaud and B. Cotterau, “Industrial Program GEN 2000 from TTE Improved Ku-Band TWT with Efficiency More than 70% Efficiency,” AIAA2000-1160, pp. 613-618, Apr. 2000

[5] G. K. Kornfeld, “Development in Efficiency, Improvements and Trends,” 1995 TWTA Workshop, 1995 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, May 1995..

[6] K-H. Hubner, “Traveling Wave tube Amplifier State-of-Art and Future Trends,” ESA/NATO 1997 Workshop on Microwave Tubes for Space, Military and Commercial Applications, WRR-127 pp. 33-41, Apr. 1997

[7] S. Heider, “The Commercial Space TWTA Market-Review And Trends,” ESA/NATO 1997 Workshop on Microwave Tubes for Space, Military and Commercial Applications, WRR-127 pp. 63-68, Apr. 1997

[8] P. Gosset and E. D. Maloney, “12GHz TWT for TV Broadcasting,” Microwave Journal, pp. 47-48, Jul. 1978

[9] D. Deml, “High power Satellite Traveling Wave Tubes with 200W and 450W Output Power,” 1980 AIAA pp. 112-116, 1980

[10] Y. Morishita, M. Sasaki, T. Kimura, H .Kubo, K. Tsutaki, and T. Koike, “A 12GHz, 150W raveling-Wave Tube Amplifier for Broadcasting Satellites,” 1986 AIAA, pp. 586-593, 1986.

[11] 中川仁、森下洋治、星野均、吉田満、浜田定憲、“放送衛星用 12GHｚ 110W～170W 高効率進行波管” 信学技報 ED94-111, pp. 57-62, Dec. 1994

[12] M. Horder, E. Bosch, P. Ehret and Dr. H. Seidel, “Low frequency TWTs for Satellite Communications,” AIAA-2001-963, Apr. 2001

[13] Boeing 社カタログ

[14] Takashi Kanamoto, Hideichi Kubo, Noboru Koga and Yoshitomo Iwanami, “S-Band 14W Space TWTA for Digital Audio Broadcasting,” AIAA-98-1280, Feb. 1998.

[15] G. Fleury and Dr. G. Kornfeld, “Satellite Traveling Wave Tubes New Achievements in Production & Development Trend,” AIAA-98-1276, Feb. 1998

[16] Thales 社カタログ

[17] J. Herrvier, F. Andre R. Christ and L. Desmettre, “ Ka-Band TWTs: A groth Market,” AIAA-2001-957, Apr. 2001.

[18] 山本哲生, 九里孝輝, 浜田貞徳, 片上勘次, 根本昭彦, “衛星搭載用 40GHz 帯 30W 進行波管,” NEC 技報 Vol.47, No.10, pp.111-115, 1994

[19] K-H.Hubner, “A 60GHz Traveling Wave Tube Amplifier for Internsatellite Links,” AIAA-2001-92, Apr. 2001.

[20] 内川達也, 吉田満, 片上勘次, “高効率 Ka 帯 120W 衛星搭載用 TWT,” 信学技報 ED98-182, pp.95-100, 1998.

[21] Sadanori Hamada, Kanji Katakami, Mitsuru Yoshida, Masaki Takahasi, Yoshitomo Iwanami, “High Power Space TWTA Development Activities for New Broad casting Satellites,” NEC Research & Development, No.95, pp.44-52, Oct. 1989

[22] 吉田満, 久保英一, 牧野紀元, 三浦七郎, 瀬浦良一, “「放送衛星 3 号」搭載 TWT の開発,” NEC 技報, Vol.45, No.6, 1992.

[23] 根本昭彦, 白岩聡, 吉田満, 片上勘次, “Ku 帯 80～125W 衛星搭載用進行波管,” 信学技報, ED96-128, pp.7-12, Dec. 1996.

[24] C. Smith, Dr. C. Armstrong, J. Duthie, Dr. G. Pierce, M. Sievers, “MPM Technology-the Miniaturized Transmitter Solution,” ESA/NATO 1997 Workshop on Microwave Tubes for Space, Military and Commercial Applications, WRR-127 pp. 83-90, Apr. 1997

[25] T. Ninns, T. Schoemehl, W. Pelster, R. Watkins, J. Taylor, G. Lednum, J. Mckay and P. Ballagh, “Microwave Power Modules: Technology for the future,” ESA/NATO 1997 Workshop on Microwave Tubes for Space, Military and Commercial Applications, WRR-127 pp. 91-96, Apr. 1997

[26] D. R. Whaley, C. M. Armstrong, B. Cannon, G. Groshart, E. Hurt, J. Hutchins and M. Roscoe, “60% Efficiency Miniature C-Band TWT for the Microwave Power Module,” ESA/NATO 1997 Workshop on Microwave Tubes for Space, Military and Commercial Applications, WRR-127 pp. 77-82, Apr. 1997

[27] G. Groshart and C. Armstrong, “Vacuum Power Booster Development for the Power Module,” 1995 TWTA Workshop, 1995 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, May 1995..

[28] Takatsugu Munehiro, Kurao Nakagawa, Hunichi Matsuoka and Hajime Fukui, “Development of a 30GHz-Band 20W Microwave Power Module,” AIAA-98-1281, Feb. 1998.

[29] T. Takesue, Y. Iwanami and Y. Oogushi, “A Compact EPC for Ku-Band 100W Space TWTA,” AiAA-98-1275, Feb.1998.

[30] Gunter Kornfeld, “Reliability Considerations for Satellite TWTs,” Microwave Journal, pp.113-125, Aug. 1984.

[31] Shichiro Miura, Kanji Katakami and Yasuhiro Akiyama, “Reliability Assurance of NEC Space TWTs” NEC Res. & Develop., Vol.37,No.2, pp.249-259,Apr. 1996.

[32] Tsunenori Akanuma, Sadayuki Kadoo, Makoto Sasaki, Hikaru Honda, Tatsuya Koike and Kenji Takahashi, “12GHz 120W TWTA for Next Japanese Broadcasting Satellite, BS-3,” Denshi Tokyo, No. 28, pp.70-73, 1989.

[33] Akira Chiba and Yashuhiro Akiyama, “Life Test Evaluation of 411M Cathode for Highly reliable Satellite TWTs,” Applied Surface Science, No.146, pp.120-125, 1999.

[34] F.Bosscrt and R. Lotthammer, “Update of AEG Space TWT Reliability,” Space TWTAs 1994 Workshop, ESA WPP-072, May 1994.

[35] D. S. Komm and R. T. Longo, “Space TWT Cathode Manufacturing Improvement at EDD,” 2nd IEEE International Vacuum Electronics Conference IVEC, ESA Wpp-189, 2001.

[36] 齋藤成文, “放送衛星号 a の不具合,” 日本宇宙開発物語 三田出版会, pp208-229, 1992.

[37] Hidemasa Kawai, Satoshi Tonegawa, Ryouich Seura and Toshio Okada, “Optimization of Surface roughness on Molybdenum Electrode for Vacuum Breakdown phenomena,” Space TWTAs 1994 Workshop, ESA WPP-072, May 1994.

[38] Jos, M. Wetzer, “Vacuum Insulator Flashover,” ESA/NATO 1997 Workshop on Microwave Tubes for Space, Military and Commercial Applications, WRR-127 pp. 191-196, Apr. 1997

[39] R. Strauss, “Orbital Performance of Communication Satellite Microwave Power Amplifiers (MPAs),” International Journal of Satellite Communications, Vol.11, pp.279-285, 1993

[40] Frederic Andre, Ernst Bosch, Robert Nunn and Harald Seidel, “TWT Amplifier for Satellite Telecommunications with 200W of RF Power in Ka Band and 300W in Ku Band,” IEEE International Vacuum Electronics Conference IVEC, ESA Wpp-189, 2001.

[41] A.-M.Khilla and D. Leucht, “Advanced Ka-Band Dual Microwave Power Module “Dual MPA”,” AIAA2001-933, Apr. 2001.

[42] R. Nunn, “High Efficiency Linear TWT in Ku-Band (HELT),” ESA/NATO 1997 Workshop on Microwave Tubes for Space, Military and Commercial Applications, WRR-127 pp. 191-196, Apr. 1997

[43] Hideichi Kubo, Shichiro Miura, Kazuo Haginuma and Shuuichi Miura, “Life Characteristics of Ku-Bnad 135W TWTA Operating In-Orbit and Under Life Testing on Ground in BS-3 Program,” AIAA-98-1279, Feb. 1998

[44] BOSCH カタログ

[45] T. Canon, P. Delporete, P. Fayt, M. Gak, A. Gruwe and E. Pequet, “Flexible EPC for Telecommunication Satellite RWRAA,” AIAA-2001-121, Apr. 2001

[46] Boeing カタログ

[47] 亀井雅,中川仁,野本俊裕、宗廣孝継,金本隆, “フェーズドアレー用進行波の開発,” 信学技報,Dec., 2002

[48] 三田長久, “衛星搭載用進行波管の高信頼性化とその実証,” 信学論 C-Ⅱ, Vol.177-C-Ⅱ, No.12, pp580-584, 1994 年

[49] G.Jaumann, “Dual Linearized TWTA with Integrated Channel Amplifier. A first Step Tiword The MPM,” ESA/NATO 1997 Workshop on Microwave Tubes for Space, Military and Commercial Applications, WRR-127 pp. 77-82, Apr. 1997.

[50] Carl R. Smith, Carter M. Armstrong, “The Microwave Power Module: A Versatile RF Building Block for High-Power Transmitters,” Proc. IEEE, vol.87, no. 5, pp717-737, May 1999.