

# MIL規格対応可搬型LTE基地局装置 (Tactical LTE Box) の開発

## Development of Portable LTE Base Station Equipment (Tactical LTE Box) Compliant with MIL Standards

田部井 康 前田 敏行 長谷川 宏一 勝又 貞行  
Yasushi Tabei Toshiyuki Maeda Koichi Hasegawa Sadayuki Katsumata

### 要 旨

当社は、プライベートLTEシステムやローカル5G<sup>1</sup>システムの市場展開を見据え、各国の公共安全、防衛、公益事業、石油、ガス、鉱業、ダム、発電所などのミッションクリティカル分野に対し容易に無線エリアを構築できるシステムの提供を目的として、Military Specification and Standards (MIL規格<sup>2</sup>) に対応したMIL規格対応可搬型LTE基地局装置 (Tactical LTE Box) を開発した。本装置は、特に公共の安全維持や防衛の分野などにおいて未舗装の悪路を走行するような場合に求められる耐振性、および寒冷地 (-32℃) でも動作する耐環境性能はMIL規格に準拠し、運搬中に誤って水没させても故障しない防水性能IP67に対応する。また、世界各国での使用を踏まえ、国別またはユーザごとに割り当てられた周波数に対応すべく、単体で700 MHz帯の複数バンド(Band 14,20,28)をカバーできるようパワーアンプの広帯域化を実現した。本装置は全てのユニットを同一きょう体内に集約したコンパクトなオールインワン構成で、電源ボタンを押すだけでLTE通信エリアを構築し、例えば高品質の映像通話を実現する。

### Abstract

In anticipation of the market deployment of private LTE systems and local 5G systems, JRC has developed a portable LTE base station equipment (Tactical LTE Box) that is compliant with Military Specifications and Standards (MIL) to provide a system that enables an easy deployment of wireless areas for mission-critical fields such as public safety, defense, public utilities, oil, gas, mining, dams, and power plants in various countries. This equipment complies with MIL standards for vibration resistance, which is required especially in the fields of public safety maintenance and defense where the equipment needs to travel on rough unpaved roads, and for environmentally resistant performance to operate even in cold regions (-32°C), and it also complies with the IP67 waterproof performance to prevent malfunction even if accidentally submerged in water during transportation. In addition, in consideration of use in various countries around the world, the power amplifier has been designed to realize a wider bandwidth so that it can cover multiple bands (Bands 14, 20, 28) in the 700 MHz band to support frequencies allocated to each country or user. This equipment designed as a compact all-in-one architecture that integrates all units in the same enclosure, and by simply pressing the power button, an LTE communication area can be deployed, enabling for example high-quality video calls.

### 1. まえがき

自営無線ネットワーク構築において、最先端の携帯電話通信技術を活用したプライベートLTEとローカル5Gの技術開発が脚光を浴びており、当社では、既にコンパクトLTEシステムを製品化している。近年、携帯電話の不感地帯や災害などにより通信手段が断絶した地域で活動する隊員が容易に現場へ搬入して設営することができ、迅速に無線通信エリアを構築し、隊員同士の通話や映像共有を提供できることが求められており、このニーズを受けて可搬型LTE基地局装置を開発した。また、700 MHz帯はプライベートLTEとして割り当てられている国が多く、この周波数帯は、他の周波数帯 (2 GHz帯や3.5 GHz帯など) と比べ装置とアンテナを結ぶケーブルにおける高周波信号損失が小さいため実装

が容易で、また電波伝搬上の特性により通信エリアの広範化も容易である。本稿では、可搬型LTE基地局装置に対し市場が求める厳しい耐環境仕様 (耐振動性能や防水性能) に対応するための技術的な取り組みについて述べる。

### 2. LTE Box開発に対する当社の技術的取り組み

LTE Boxには「eNodeB<sup>3</sup>」と「EPC<sup>4</sup>」が内蔵され、これらを一体化することにより本装置単体でLTE無線エリアの構築を可能とする。「eNodeB」は、LTE信号処理部 (BB<sup>5</sup>) と無線部 (RF<sup>6</sup>) で構成される。また「EPC」はLTE Boxに内蔵した小型PC内の仮想マシン上に搭載される。このPCに他の仮想マシンをインストールすることにより、通話用アプリケーションサーバや地図サーバなどの追加が可能となり、

<sup>1</sup> 5G (fifth Generation) : 第5世代移動体通信規格

<sup>2</sup> MIL (Military Specification and Standards) : アメリカ国防総省仕様・標準

ニーズに合わせて機能を拡張できる。MIL規格対応可搬型LTE基地局装置の外観を図1に、また諸元を表1に示す。



図1 MIL規格対応可搬型LTE基地局装置の外観<sup>(1)</sup>  
Fig.1 Appearance of portable LTE base station equipment compliant with MIL standards

表1 MIL規格対応可搬型LTE基地局装置(LTE Box)の諸元  
Table 1 Specifications of portable LTE base station equipment (LTE Box) compliant with MIL standards

型名	JRL-174
寸法	420(W) × 115(H) × 499(D) mm
質量	16 kg
電源	DC 20 ~ 33 V
対応バンド 使用周波数帯	Band14 送信：758~768 MHz 受信：788~798 MHz Band20 送信：791~821 MHz 受信：832~862 MHz Band28 送信：758~803 MHz 受信：703~748 MHz
定格送信出力	20 W + 20 W
送受信アンテナ数	2
周波数帯域幅	5/10/20 MHz
最大端末接続数	128
サブキャリア間隔	15 kHz
DL <sup>7</sup> 変調方式	QPSK <sup>8</sup> /16QAM <sup>9</sup> /64QAM
UL <sup>10</sup> 変調方式	QPSK/16QAM
動作温度	IL-STD-810H METHOD 501.7 (最高温度 +49 °C) MIL-STD-810H METHOD 502.7 (最低温度 -32 °C)
振動 衝撃	MIL-STD-810H METHOD:514.8 MIL-STD-810H METHOD:516.8
防水・防塵	IP67
認証	CE

## 2.1 きょう体の構造設計

本装置は可搬型の無線通信システムであり、通信インフラが整備されていない区域や災害により公衆網が利用困難となった被災地に設置して通信網を構築することを踏まえ、防水・防塵のアルミニウムきょう体の前面に配置される吸気口から底面ヒートシンク、背面排気口までを強制空冷放熱ダクト構造とし、小型軽量で容易な運搬・設置を可能としている。また、きょう体の縁に板金の曲げ処理を施し、耐摩耗性に優れた塗装をきょう体全面に施すことで外観の質感および接触時の安全性を高めるとともに、使いやすさを向上させている。さらに、ラックマウントに対応するため、幅を19インチ、高さを132mm (3U) 以下とした。本装置の外観を図2に示す。

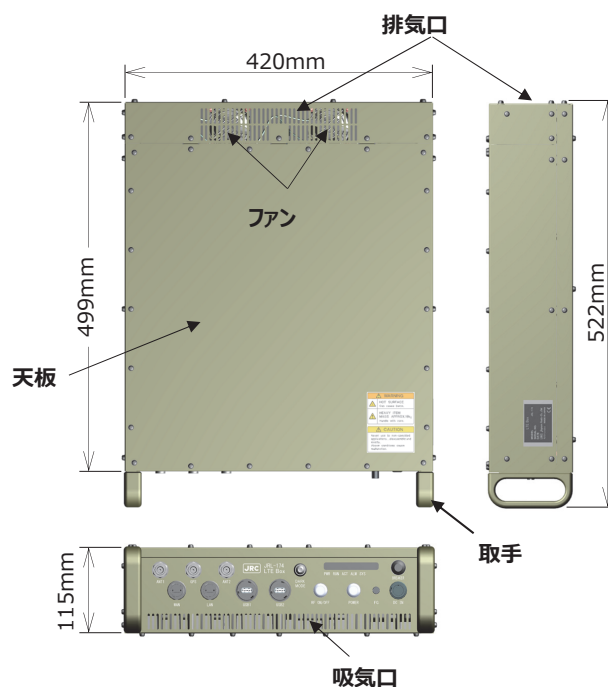


図2 装置外観

Fig.2 Appearance of the equipment

## 2.2 きょう体の放熱設計

本装置に実装される高出力のパワーアンプ (20 W + 20 W) や小型PCによる発熱が装置の電子部品の寿命や性能に影響を与えないよう、きょう体内部の温度上昇を抑えるための十分な放熱性を確保する必要がある。

このため、きょう体内に空気が滞留せず、吸気口から取り込まれた空気が底面のヒートシンクを経て背面の排気口へ一定の速度で流れるようシミュレーションを繰り返し、放熱フィンの高さや間隔、底板との距離などのパラメータ

<sup>3</sup> eNodeB (evolved Node B) : LTE基地局装置

<sup>4</sup> EPC (Evolved Packet Core) : 加入者収容装置

<sup>5</sup> BB (Base Band) : 基底帯域

<sup>6</sup> RF (Radio Frequency) : 無線周波数

<sup>7</sup> DL (Downlink) : 基地局から端末へ向けた通信経路

<sup>8</sup> QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) : 四位相偏移変調

<sup>9</sup> QAM (Quadrature Amplitude Modulation) : 直交振幅変調

<sup>10</sup> UL (Uplink) : 端末から基地局へ向けた通信経路

変更を重ね、図3に示す風速コンター（風速分布）の表示を確認しながら軽量化と砂型製造リスク軽減も考慮した最適解を導出した。きょう体内を流れる空気の流れ（断面流速ベクトル）を図4に示す。

きょう体内の空気がおおむね一定の流速で前面から背面へと流れている様子が図3に示され、空気が背面上部の排気口から排気されていることが図4に示されており、設計意図を満たすことを確認した。

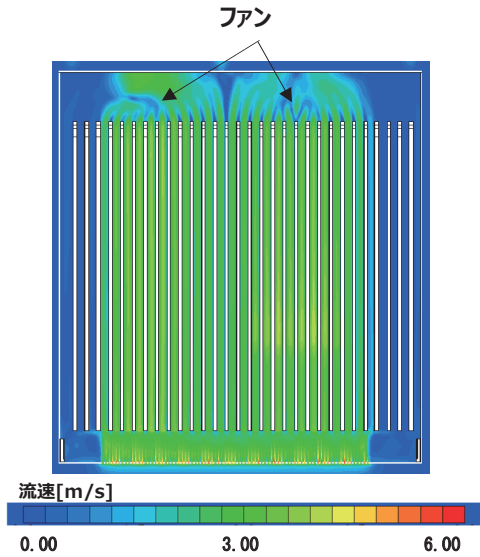
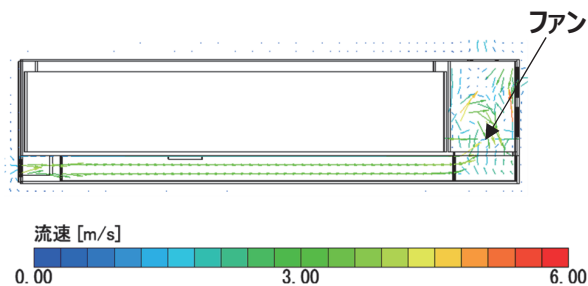
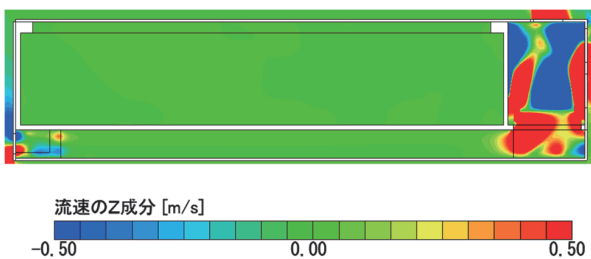


図3 風速コンター（天板側より観測）

Fig.3 Wind speed contour (observed from the top panel side)



(A) 流速ベクトル



(B) 高さ方向の速度コンター

図4 空気の断面流速ベクトルおよび速度コンター（側面より観測）

Fig.4 Cross-sectional flow velocity vector and velocity contour of air (observed from the side)

### 2.3 きょう体による耐振動性能・防水性能の向上

従来、当社製の装置は、6枚のパネルを組み合わせたきょう体構造により、振動による構造変形やねじ緩みを生じやすい弱点を有していた。この弱点を改良するため、本装置においては砂型鋳造法による頑強なきょう体と天板による構造を採用し、耐振動性能を向上させた。さらに、当社がレーダの屋外アンテナで培った特殊形状のゴムパッキンをベースきょう体と天板で押さえる構造を採用して防水性能を高め、防水規格IP67を達成した。

上記した耐振動性能および防水性能の向上に加え、部品点数を抑えた鋳造型加工の採用により、組立に要する時間短縮およびコスト低減を実現している。きょう体の構造を図5に示す。

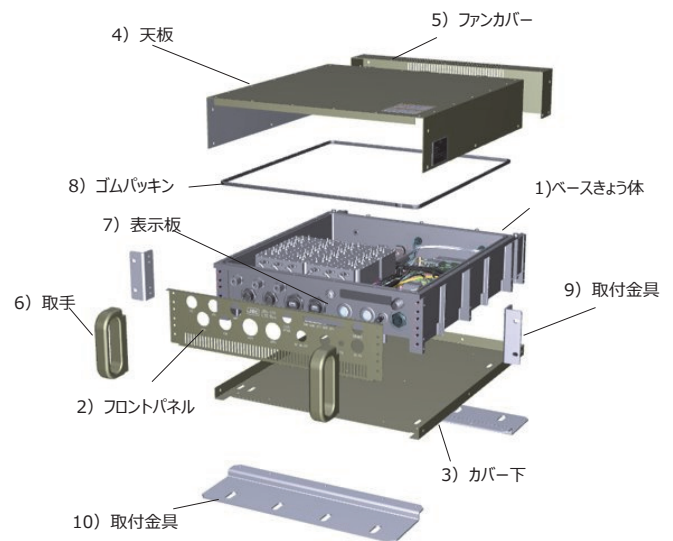


図5 きょう体の構造

Fig.5 Structure of the housing

## 2.4 広帯域・高効率パワーアンプ技術

近年、高速大容量無線通信の普及に伴い、割り当て周波数が拡大している状況下において、従来の高効率アンプは一般的に狭帯域であるがゆえに多品種化を余儀なくされていた。また5GおよびLTEの無線通信に採用される変調方式は尖頭電力対平均電力比(PAPR)が大きい<sup>11</sup>が、汎用のAB級<sup>11</sup>アンプは一般的に最大出力時にドレイン効率が最大となり、出力が下がるにつれて効率が下がる特性を有する。従来のパワーアンプは、この特性により定格出力電力における運用時のドレイン効率が大きく低下し、消費電力の増大やきょう体の大型化を招いており、可搬型装置として大きな問題となっていた。

当社はこの問題を解決する新たなパワーアンプを開発した。新たなパワーアンプは単独で複数バンドをカバーし、バンド切り替えを不要とするとともに、小型、低消費電力および低発熱(汎用パワーアンプに比べ発熱量50%以下)を実現している。

新たに開発したパワーアンプは、最適化された専用パワーデバイスと広帯域整合回路によるDoherty<sup>\*1</sup>方式とし、前置歪補償<sup>12</sup>(Predistortion)の採用により高い歪補償性能を実現した。またパワーデバイスにおいて発生した熱をきょう体へ直接逃がす構造とすることにより、動作の安定性を高めている。新たに開発したパワーアンプの仕様を表2に示す。

※1 一般的な増幅回路(A級~C級アンプ)は、最大出力時においてドレイン効率が最大となり、出力が下がるとドレイン効率が下がる特性を示すが、この特性は、振幅変調信号(時間とともに出力レベルが変化する)を増幅する際には増幅回路の歪が少ない領域まで平均電力値を下げて使用しなければならないので、欠点となる。Dohertyは、振幅変調信号を増幅する際に平均電力値の効率を改善する。

表2 新たに開発したパワーアンプの仕様

Table 2 Specifications of the newly developed power amplifier

周波数	758 ~ 821 MHz
ゲイン偏差	±1.0 dB
定格出力時の終段部ドレイン効率	50%以上

## 3. きょう体の評価

### 3.1 耐振動試験

本装置はMIL規格の振動によりきょう体の変形やねじの緩みが生じないことが要求されるため、鑄造の頑強なきょう体構造とし、かつ組立構造を単純化することにより本要求を満たした。耐振動試験の評価方法について以下に述べる。

#### (1) 評価方法

図6に示す車載振動を想定したMIL-STD-810H METHOD:514.8<sup>(2)</sup>の条件に従い、垂直方向(Vertical)、横方向(Transverse)、縦方向(Longitudinal)にそれぞれランダム振動を与える。

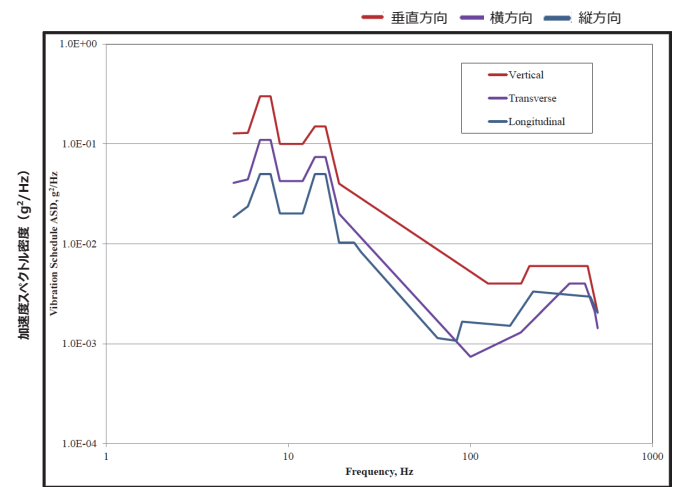


Figure 514.8C-6. – Category 4 – Composite wheeled vehicle vibration exposure.

図6 MIL-STD-810H METHOD:514.8ランダム振動条件  
Fig.6 MIL-STD-810H METHOD:514.8 Random vibration conditions

#### (2) 評価結果

MILランダム振動試験の実施後にLTEシステムが正常に動作し、データ通信ができることを確認した。また、各方向の振動を与えた都度、ねじやコネクタの緩みおよび部品の破損が生じていないことを確認した。MILランダム振動試験の様子を図7に示す。

<sup>11</sup> 基本増幅回路の動作級：増幅回路の基本的な動作点を示し、A級、AB級、B級、C級などがある。動作級により動作効率および歪性能が異なる

<sup>12</sup> 電力増幅器において発生する歪に対し逆の特性を持つ信号をあらかじめ入力信号に付加し、電力増幅器の出力信号における歪を打ち消す技術

←→ : 振動方向, C1,C2 : 振動試験機の制御部 (control) ※2点で制御しているためC1,C2の位置に加速度センサを装着する  
 A : 装置 (LTE Box) の振動状況の監視位置 ※一般的に振動が最大となる位置とする (加速度センサ装着位置)

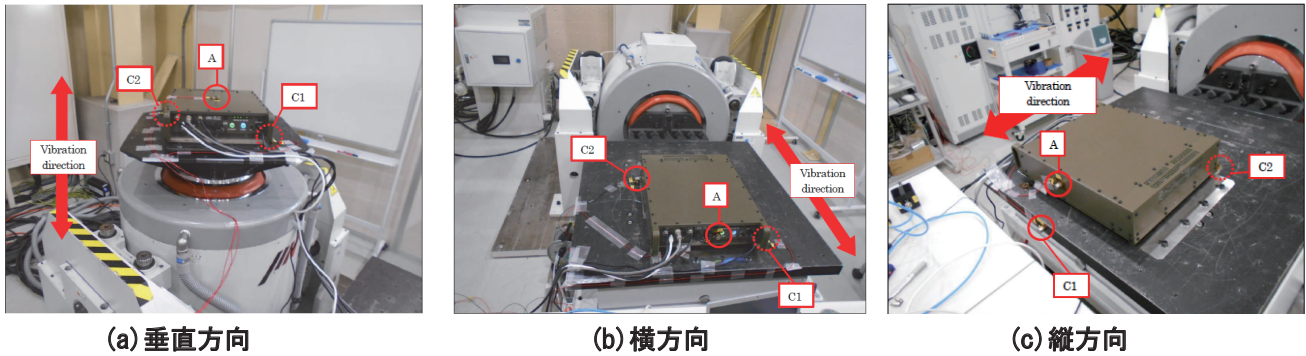


図7 MILランダム振動試験の様子  
 Fig.7 MIL random vibration test

### 3.2 気密試験

本装置には気密性を維持するために粉塵や水滴が外部から侵入しないことが要求されるため、砂型きょう体特有の巣穴による気密漏れを防ぐ対策としてベースきょう体の試作および試験を繰り返した。また、ベースきょう体、ゴムパッキンおよび天板による組立構造の単純化に加え、防水防塵コネクタの採用により本要求を満たした。

#### (1) 評価方法

表3-1および表3-2に示す保護等級において規定される保護レベルの定義に従って防塵防水試験を実施し、試験後にきょう体内部に埃や水滴が侵入していないことを確認した。

表3-1 防塵に対する保護等級と規定される保護レベルの定義

Table 3-1 Protection class and definition of specified protection level, against dust proofing

保護等級	IPコード	保護レベルの定義
6	IP6X	粉塵が内部に全く侵入しない (耐塵型)

表3-2 防水に対する保護等級と規定される保護レベルの定義・試験方法

Table 3-2 Protection class and definition/test method of specified protection level, against waterproofing

保護等級	IPコード	保護レベルの定義・試験方法
7	IPX7	規定の圧力および時間で水中に浸漬しても有害な影響を受けない (防浸型)
		水深1mの真水中に30分間浸す

#### (2) 評価結果

防塵試験および防水試験の実施後にゴムパッキンの内側 (きょう体内部) へ粉塵や水滴が侵入していないことを確認した。防塵試験および防水試験の様子をそれぞれ図8および図9に示す。



図8 防塵試験の様子 (IP6X)  
 Fig.8 Dustproof test (IP6X)

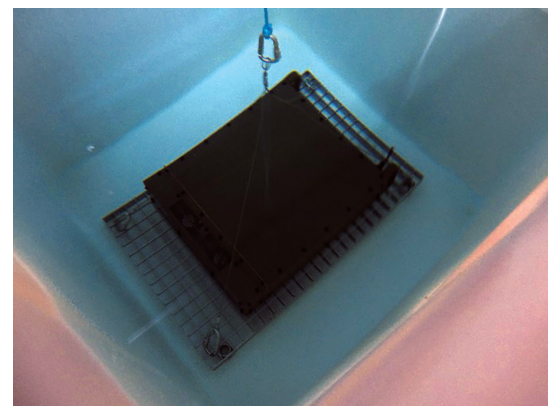


図9 防水試験の様子 (IPX7, 水深1m)  
 Fig.9 Waterproof test (IPX7, water depth 1 m)

## 4. パワーアンプの評価

パワーアンプは63 MHzにわたる広帯域 (758~821 MHz) をカバーする設計とし、700 MHz帯の複数のバンドにおける使用を可能とした。

### 4.1 Doherty回路のドレイン効率特性 (パワーアンプのドレイン効率特性)

本装置の消費電力およびきょう体の放熱性能により求められるパワーアンプの動作効率が要求仕様を満たすことは重要な課題である。当社はDoherty方式を採用することにより、バックオフ領域 (パワーアンプの飽和出力レベルからPAPR分を差し引いた出力レベル) の特性を改善し、本課題を遂行した。

#### (1) 評価方法

パワーアンプの出力電力が43 dBmから53.5 dBmの範囲における入力電力と消費電力を計測し、Doherty回路のドレイン効率を算出する。算出結果から、既定の平均出力電力以上の領域でドレイン効率が要求仕様を満たすことを確認する。

#### (2) 評価結果

Doherty回路-アンテナ端子間の高周波信号通過損失を約2 dBとすると、装置のアンテナ端子における出力電力が仕様で規定される20 W (+43 dBm) である時、Doherty回路の出力電力は+45 dBmとなる。この時のドレイン効率は60%であり、定格出力電力運用時におけるパワーアンプのドレイン効率として十分な値であることが確認できた。Doherty回路のドレイン効率特性を図10に示す。

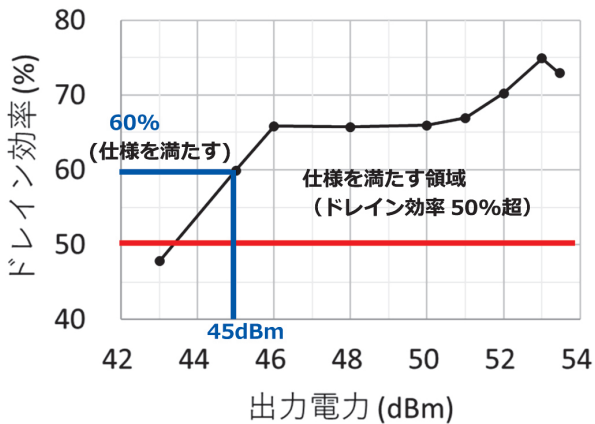


図10 Doherty回路における出力電力対ドレイン効率<sup>※2</sup>の特性

Fig.10 Characteristics of output power versus drain efficiency in Doherty circuits

※2 ここでは「増幅器の効率」を「終段増幅器の電源入力電力と高周波出力電力の比」と定義付ける (終段の増幅素子にFETを採用するためドレイン効率とする)。

### 4.2 Doherty回路の入出力特性

本装置には、3GPP<sup>13</sup>のスペクトラム仕様を満足するためにアンプの直線性が要求される。当社は、Doherty回路を構成している Carrier Amplifier (CA<sup>14</sup>) と Peak Amplifier (PA<sup>15</sup>) の負荷インピーダンス最適化を図り、さらにCAおよびPAの各々の出力電力波形が電力合成点において広帯域にわたり同位相となるよう設計し、この要求を満たした。Doherty回路の構成を図11に示す。

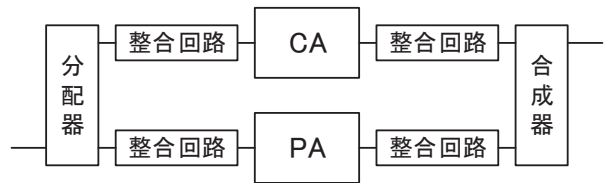


図11 Doherty回路の構成

Fig.11 Configuration of Doherty circuit

#### (1) 評価方法

パワーアンプの出力電力が43 dBmから53.5 dBmの範囲において、入力電力を変化させたときの出力端におけるゲイン変動量 (AM-AM変換) と位相変動量 (AM-PM変換) を算出する。算出結果から、ゲインおよび位相の変動幅が共に歪補償性能の仕様で規定する範囲内 (AM-AM変換: ±1 dB以内, AM-PM変換: ±5 deg以内) であることを確認する。

#### (2) 評価結果

仕様で定められた周波数および出力電力の全域において仕様を満たし、高い直線性を示すことが確認できた。試作したDoherty回路の入出力特性を図12に示す。

### 4.3 送信信号の隣接チャネル漏洩電力 (ACLR) 特性と歪補償性能

本装置には、3GPPのACLR特性の仕様を満足する高い歪補償性能が要求される。当社は、4.2項にて説明した直線性が高いパワーアンプと歪補償回路 (Predistortion) を組み合わせることにより、この要求を満たした。

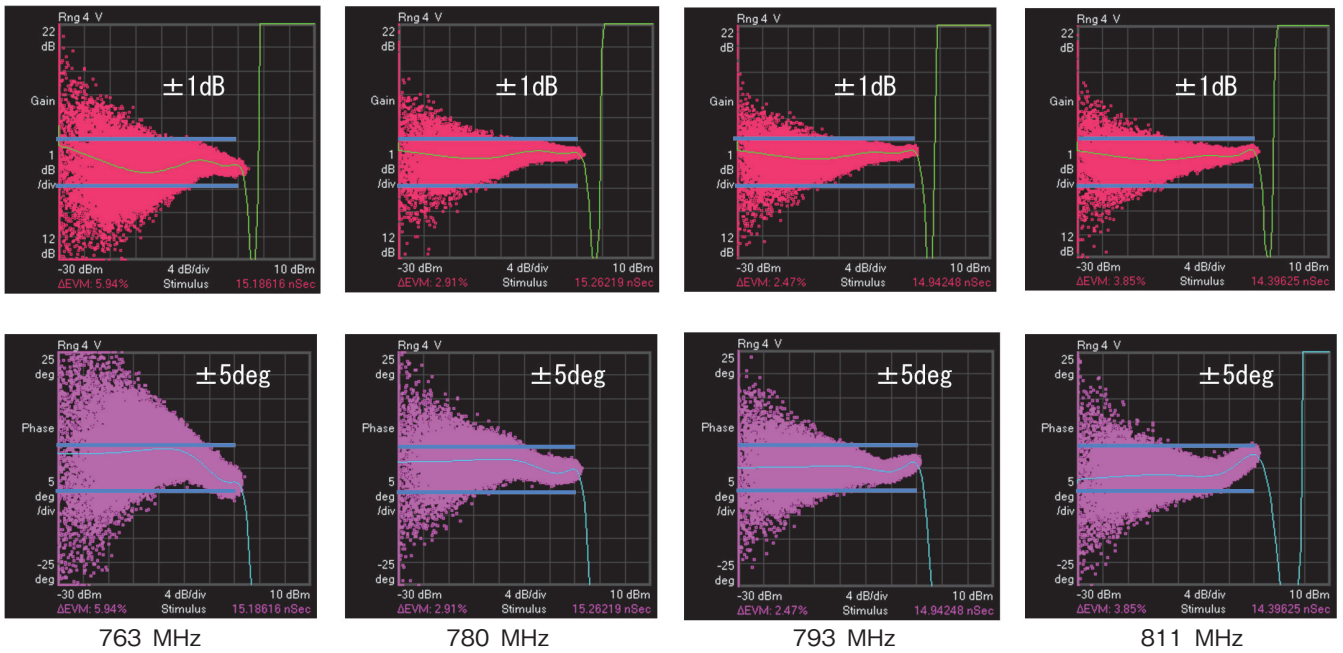
#### (1) 評価方法

eNodeBのLTE信号 (ベースバンド信号) の処理部においてテスト信号 (3GPP E-UTRA Test Model (E-TM1.1)) を生成し、装置の出力信号のスペクトラムを測定し、ACLRが仕様で規定する範囲内 (-44.2 dBc以下) であることを確認する。

<sup>13</sup> 3GPP (Third Generation Partnership Project) : 移動体通信システム (5G/4G/LTEなど) の技術仕様

<sup>14</sup> CA (Carrier Amplifier) : 搬送波信号の増幅器

<sup>15</sup> PA (Peak Amplifier) : 瞬時電力が大きい場合にCAを補う増幅器



※763 MHzから811 MHzまでの広帯域においてAM-AM変換およびAM-PM変換の変動幅が仕様を満たしている (±1 dB以内, ±5 deg 以内)

図12 試作したDoherty回路の入出力特性 (上段: AM-AM変換, 下段: AM-PM変換)  
 Fig.12 Input/output characteristics of the prototype Doherty circuit  
 (upper row: AM-AM conversion, lower row: AM-PM conversion)

技術論文

(2) 評価結果

広帯域特性および高い電力ドレイン効率特性を有する新開発のパワーアンプと歪補償回路により、本装置の送信信号に適切な帰還制御が施されていることが確認された。歪補償後における送信信号のACLR特性を図13に示す。ACLR特性は図13に示されるとおり-52.5/-51.2 dBcであり、仕様で規定する値 (-44.2dBc以下) を十分に満たしている。

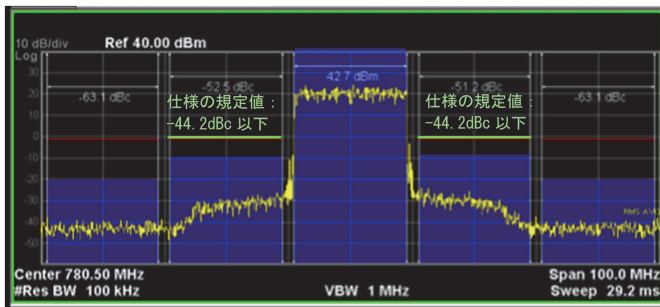


図13 歪補償後における送信信号のACLR特性

Fig.13 ACLR characteristics of the transmitted signal after distortion compensation

5. あとがき

当社は「プラチナバンド」と呼ばれる周波数帯 (700 MHz帯) をカバーするMIL規格に対応した可搬型LTE基地局を開発した。本装置は、携帯電話の不感地帯や災害などにより通信手段が断絶した地域におけるライフラインや人命救助の際の通信手段として大きな社会貢献を果たす。

当社は今後、本装置の開発によって培った技術を応用し、ローカル5Gネットワークの構築を可能とする可搬型基地局システム「Tactical 5G Box」を開発する予定である。

関連情報

- (1) LTE Box製品紹介サイト <https://www.jrclte.com/jrc-tactical-lte-box>
- (2) 米国防総省MIL規格サーチサイト (ASSIST) [https://quicksearch.dla.mil/qsDocDetails.aspx?ident\\_number=35978](https://quicksearch.dla.mil/qsDocDetails.aspx?ident_number=35978)

※本装置の仕様は“MIL-STD-810 Revision H”に基づく