

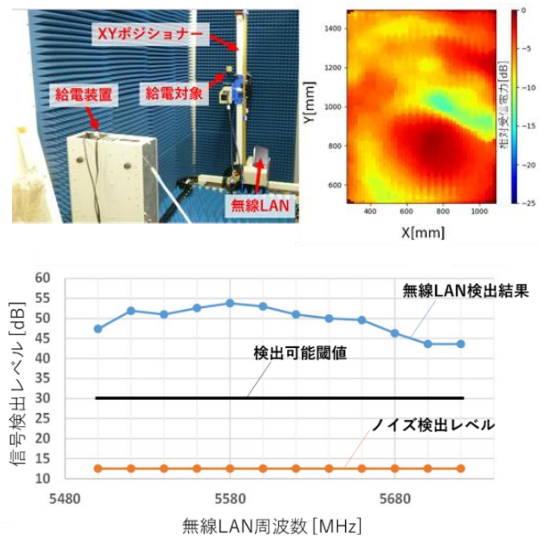
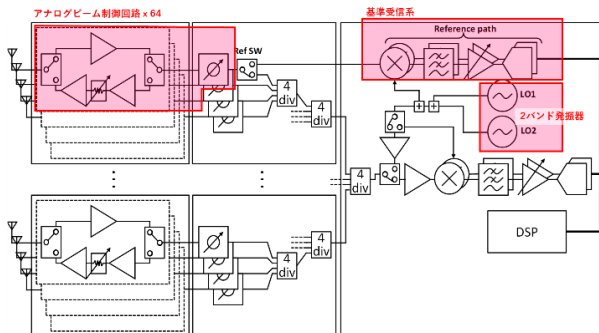
5.7GHz 帯マイクロ波を用いたワイヤレス給電システムの開発 Wireless Power Transfer System Using 5.7GHz Band Microwaves

三友 敏也[†] 荒井 和輝[†] 坂 耕一郎[†] 谷口 健太郎[†]
Toshiya Mitomo[†] Kazuki Arai[†] Koichiro Ban[†] and Kentaro Taniguchi[†]

[†] 株式会社東芝
Toshiba Corp.

概要

近年、マイクロ波を利用して離れた場所へエネルギーを供給する空間伝送型ワイヤレス電力伝送システム（以下 WPT（Wireless Power Transfer）システム）へのニーズが高まっている。空間伝送型 WPT システムは、利用周波数として日本国内で 920MHz 帯・2.4GHz 帯・5.7GHz 帯が活用可能である。中でも 5.7GHz 帯は最も大きい電力（空中線電力 32W）で給電することが認められており、デジタルデバイスや IoT センサなど、幅広いアプリケーションへの適用が想定される。また、波長が短いことからアンテナサイズを小さくすることができ、小型・軽量な専用装置の開発が可能である。本発表では、5.7GHz 帯の小型・高効率な WPT システムに関して、ビームフォーミングを利用したターゲット追従、既存システムとの共存の取り組みについて紹介する。



谷口他 “5.7GHz 帯マイクロ波を用いた小形・高効率ワイヤレス給電システムの開発”, 電子情報通信学会 IEICE 開始 vol.107, 2024

図 提案する WPT 送電システム構成

図 受電追従及び無線 LAN 信号検出結果

Abstract

Recently, a spatial transmission-type wireless power transfer systems (WPT systems) that supply energy to distant locations using microwaves is attracting attention. In Japan, the WPT systems can utilize frequencies of 920MHz, 2.4GHz, and 5.7GHz. The 5.7GHz band can supply the largest power (32W of antenna input), making it suitable such as IoT sensors. This presentation introduces the compact WPT system using the 5.7GHz band, focusing on target tracking using beamforming and efforts to coexist with existing systems.

**5.7GHz帯マイクロ波を用いた
ワイヤレス給電システムの開発**
Wireless Power Transfer System using
5.7GHz Band Microwaves

三友 敏也 荒井 和輝 坂 耕一郎 谷口 健太郎

Toshiya MITOMO Kazuki ARAI Koichiro BAN and Kentaro TANIGUCHI

株式会社東芝

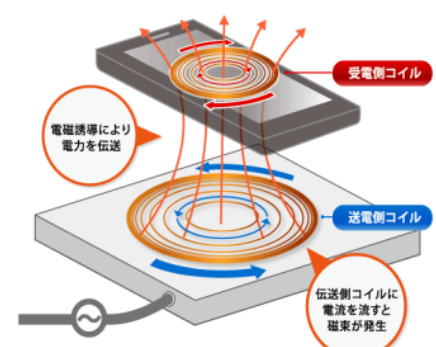

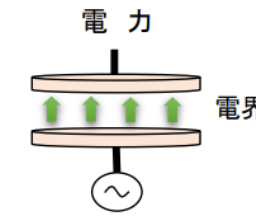
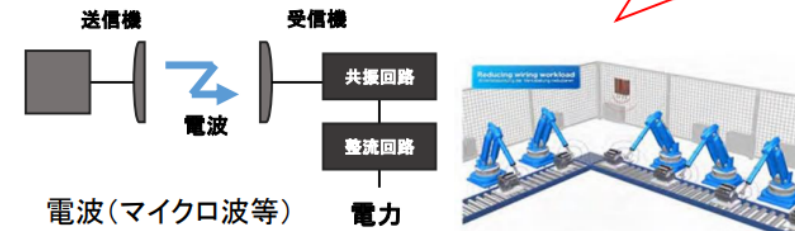
Toshiba Corp.

**toshiya.mitomo@toshiba.co.jp, kazuki1.arai@toshiba.co.jp,
koichiro.ban@toshiba.co.jp, kentaro.taniguchi@toshiba.co.jp**

アジェンダ

- 01 マイクロ波を用いた遠隔給電概要
- 02 給電システムの基本構成と課題
- 03 課題を解決する給電装置の提案
- 04 まとめ

マイクロ波遠隔給電と他の無線電力伝送方式との違い

方式	磁界結合方式	
	電磁誘導方式	磁界共振結合方式
原理・特徴	 <p>給電側と受電側の2つのコイルが起こす「磁束」によって送電。ほぼ密着して使用。</p> <p>実用化済</p>	 <p>給電側と受電側の2つのコイルが起こす「磁界共振」によって送電。</p> <p>実用化済</p>
方式	電界結合方式	空間伝送方式
原理・特徴	 <p>送電側と受電側の電極が接近（ほぼ密着）した時に発生する電界を利用して送電。</p> <p>実用化済</p>	 <p>電波(マイクロ波等)により、遠方に送電。受信した電波のエネルギーを電流に変換して使用。</p> <p>実験段階</p>

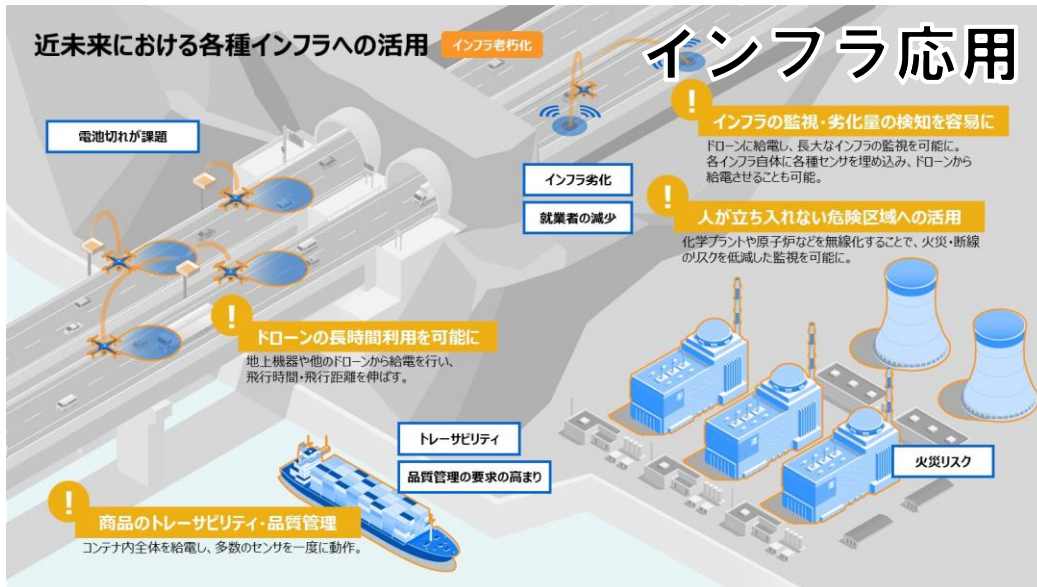
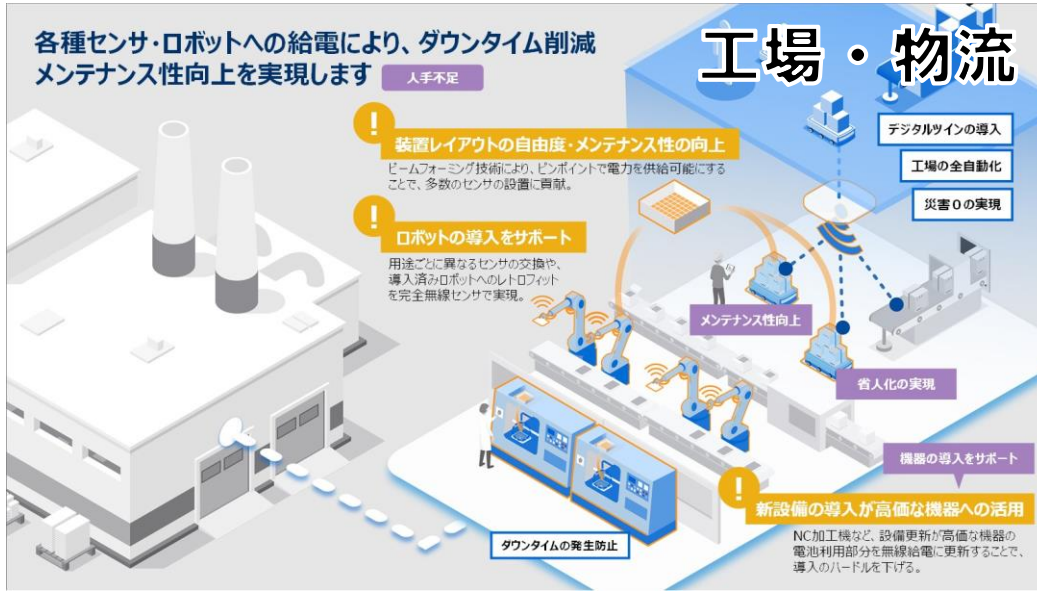
- ◆ 近接
 - cmオーダー
- ◆ 中～大電力
 - 数W～kW
- ◆ 1対1



- ◆ 遠隔
 - ～数m
- ◆ 小電力
 - mW～W
- ◆ 1対多

電波(マイクロ波)を用いてアンテナからアンテナへ電力を伝送

マイクロ波遠隔給電のアプリケーションイメージ



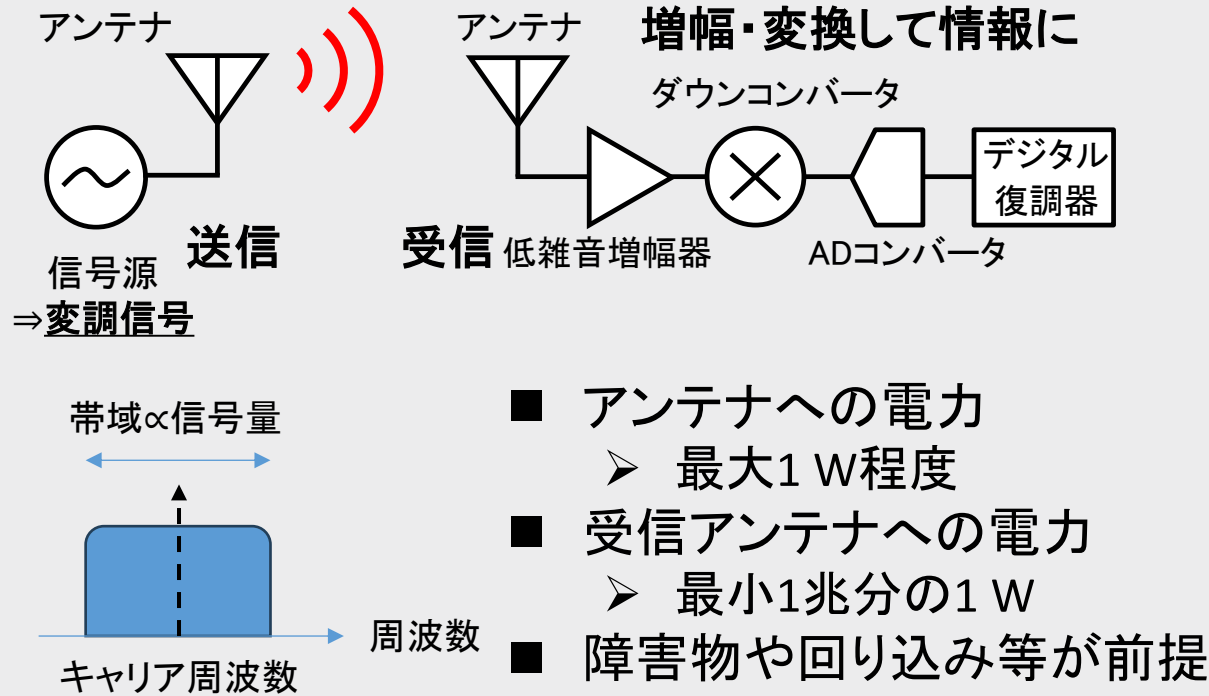
■ 遠隔給電のメリット

- 完全無線化による配置自由・断線レス
- 1対多対応による容易な給電

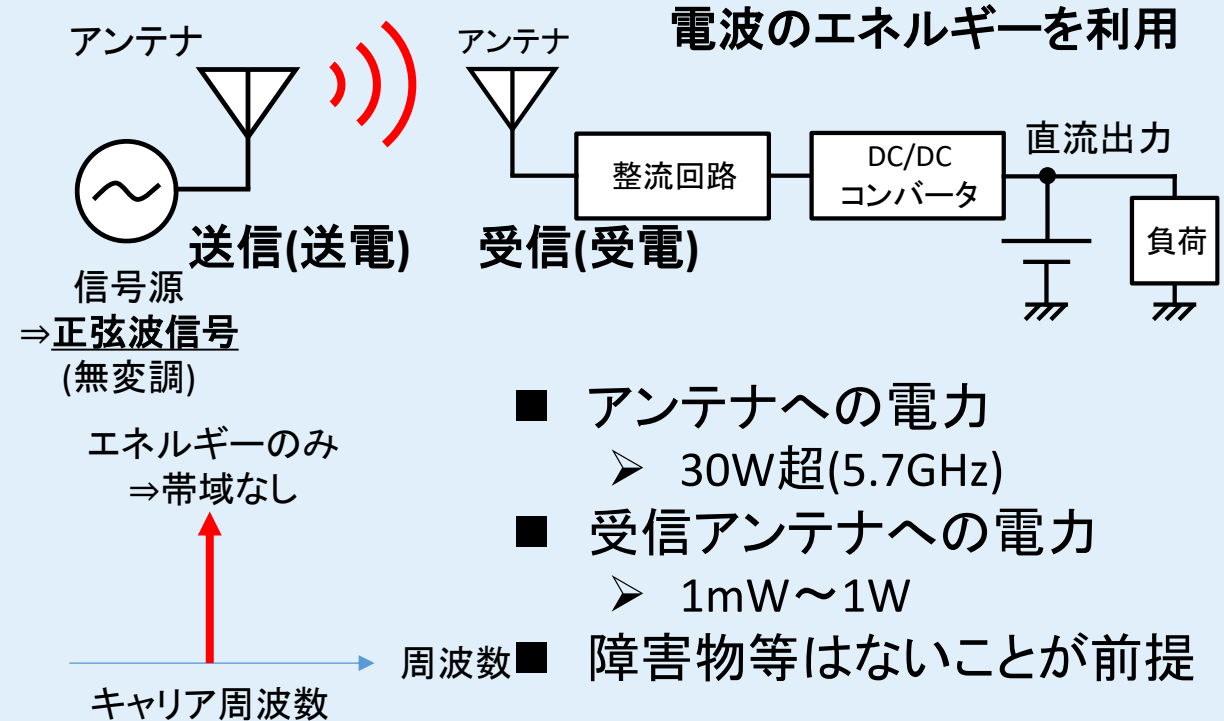
■ 室内・無人環境から屋外・友人環境及び大電力化

マイクロ波ワイヤレス給電システムの基本構成

通信向け無線システム



給電向け無線システム

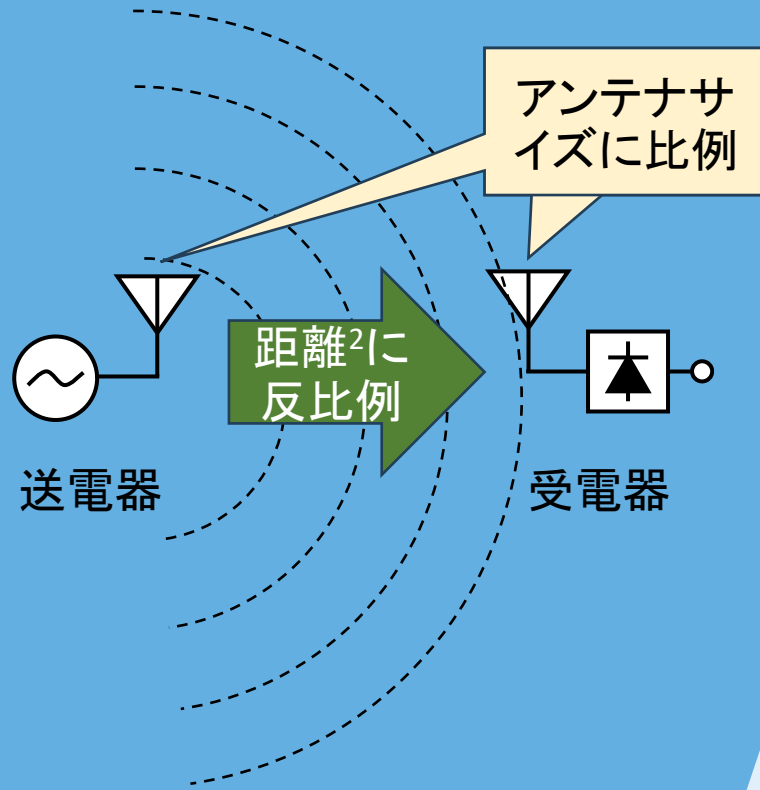


通信システムと給電システムの比較

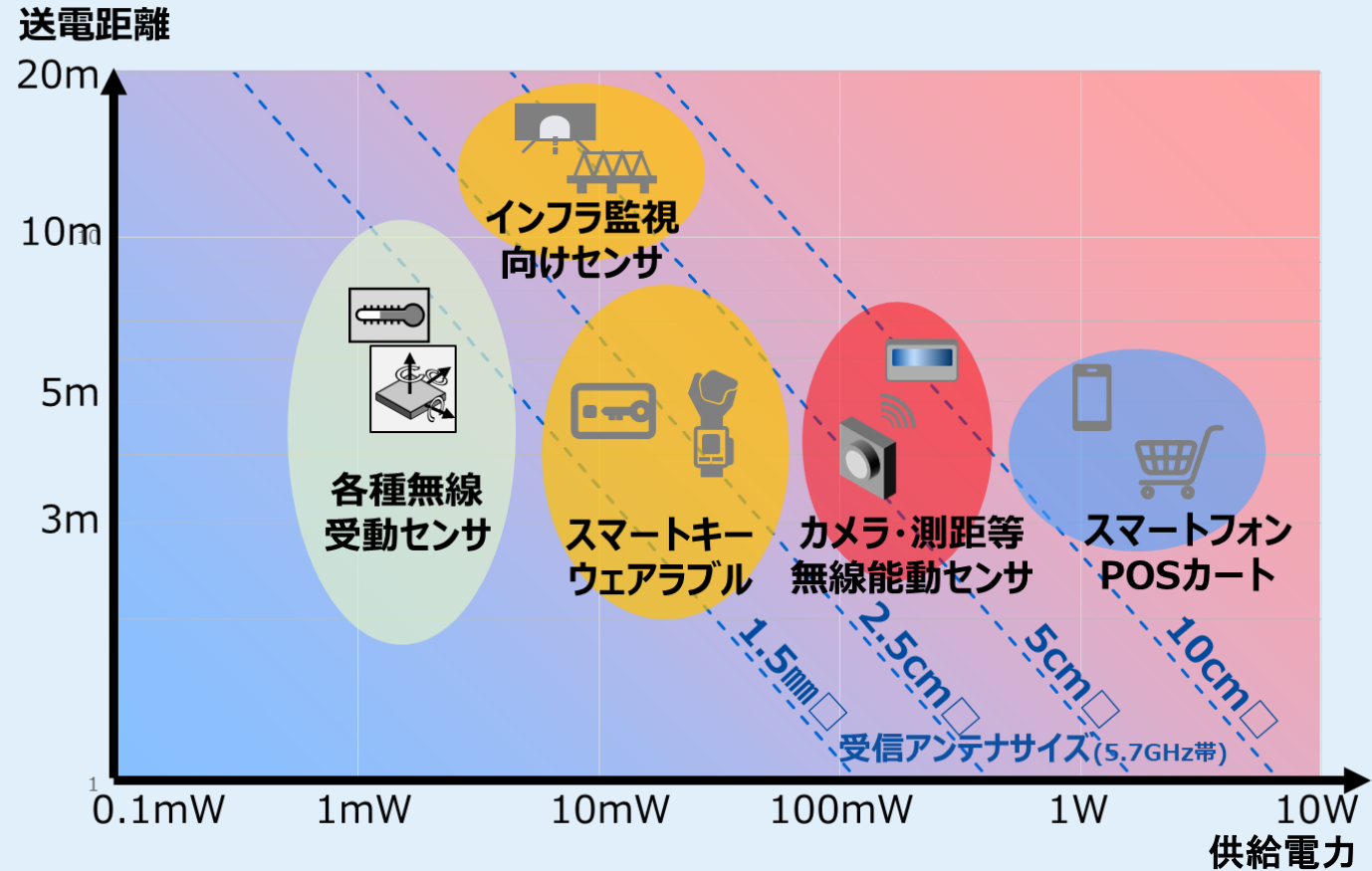
電波の送受がある点は無線通信と同じ⇒電力・変調・受信構成が大きく異なる

給電距離と電力のイメージ

送受間距離による減衰



送受間距離と電力の関係



給電対象・サイズ・台数・コストなどを勘案して仕様を決める必要

給電に必要な仕様(EIRP)

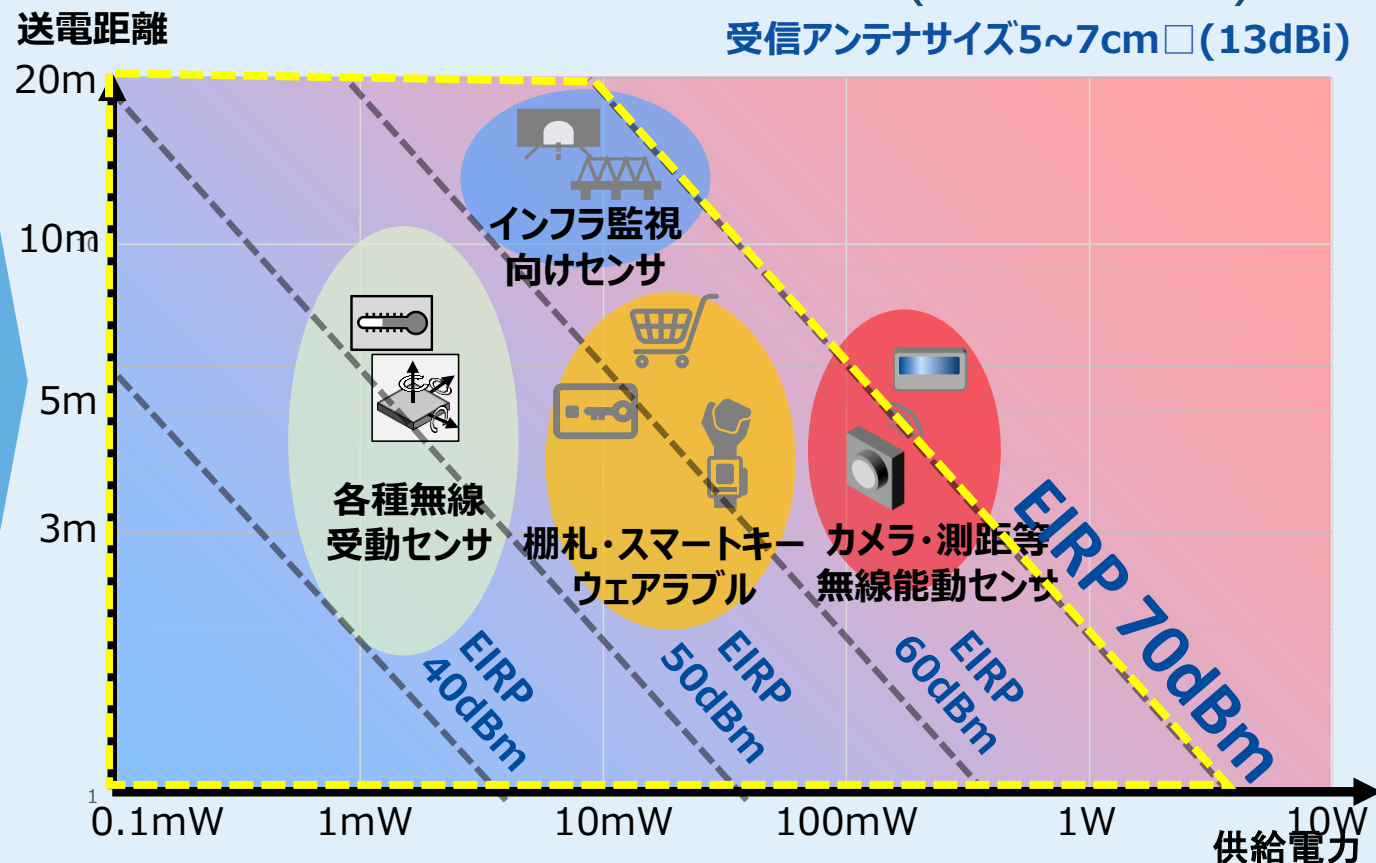
EIRPとは？



EIRP: Equivalent Isotropic Radiation Power
等価等方放射電力

供給電力: 45dBm (32W)
アンテナ利得: 25dBi
で70dBm相当

EIRPと各種アプリの関係(5.7GHz帯)



- アンテナ供給電力とアンテナ利得の積(単位は電力)右図のアプリをカバーするためには70dBm必要(0dBm: 1mW)
 - 無線LAN等に比べると40dB(1万倍)大きいことに相当(電力と指向性の積であることに注意)

高利得アンテナ(25dBi)、大電力(45dBm(32W))のシステムが必要

アジェンダ

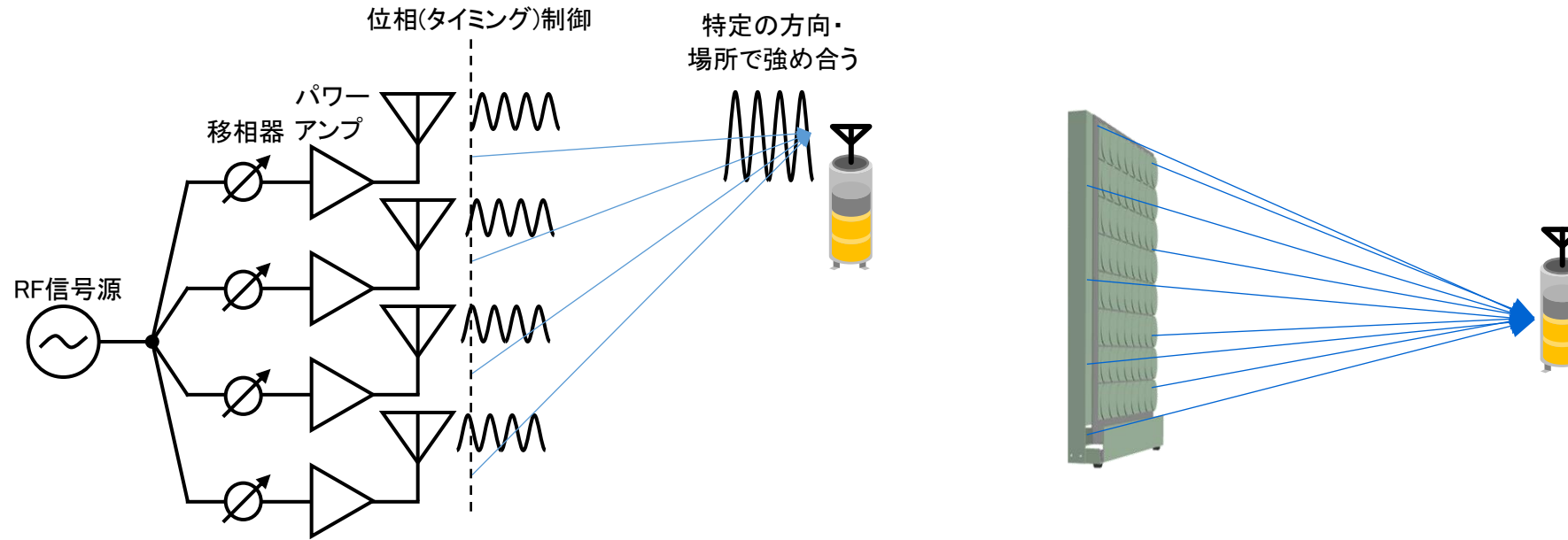
- 01 マイクロ波を用いた遠隔給電概要
- 02 給電システムの基本構成と課題
- 03 課題を解決する給電装置の提案
- 04 まとめ

マイクロ波電給電を行うアプローチ

- 70dBmのEIRPを達成するために
- 大電力(32W, 45dBm)の供給
- 高利得(25dBi)のアンテナ実現

大電力・高利得アンテナをどう実現するか？

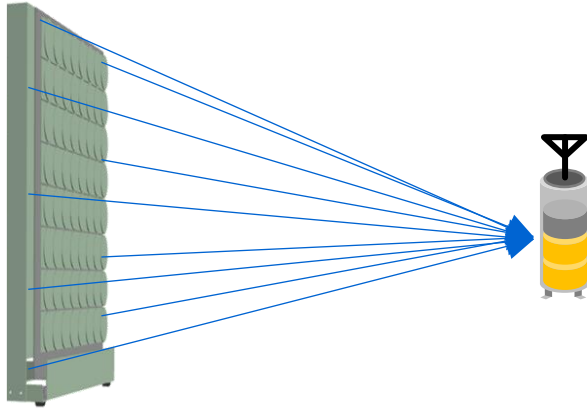
マイクロ波電給電を行うアプローチ



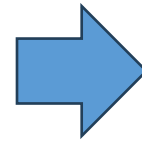
- アンテナ指向性の合成で高利得を実現
- 多数素子から出力するため、アンテナ前のアンプの負担軽減

多素子アレーアンテナ及び移相制御(ビームフォーミング)を用いることで実現

マイクロ波電給電を行う際の課題1



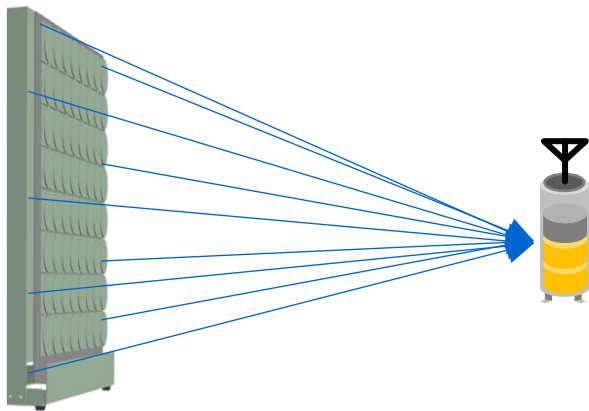
- 多素子(64素子)
ビームフォーミングシステム
 - 25dBiの利得、32Wの出力実現



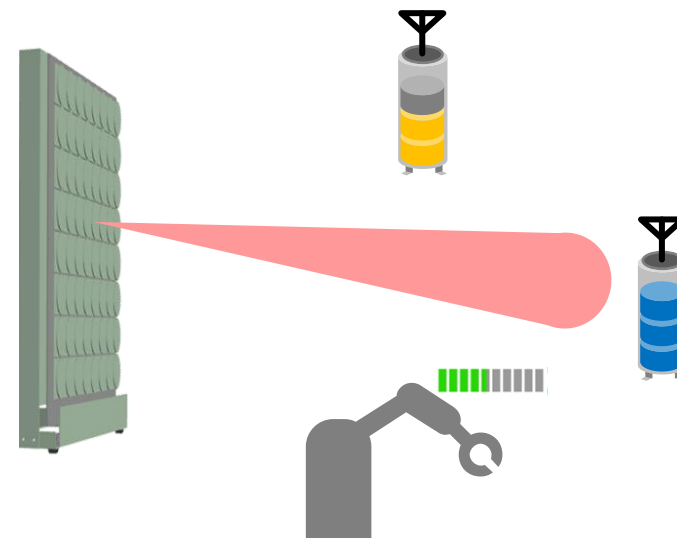
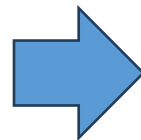
- 多数のアンテナ利用
 - コスト増大
 - 大型化

多素子⇒コスト大・大型化

マイクロ波電給電を行う際の課題2



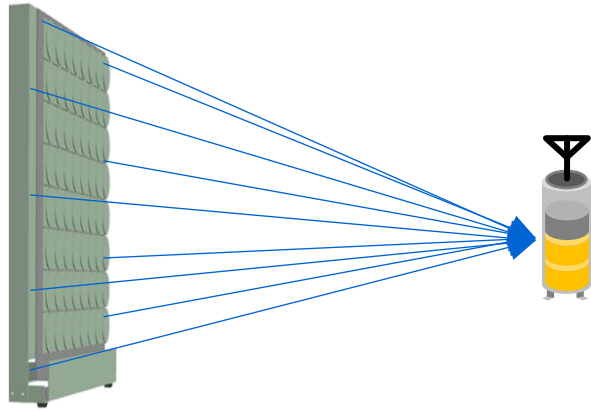
- 高利得システムの実現



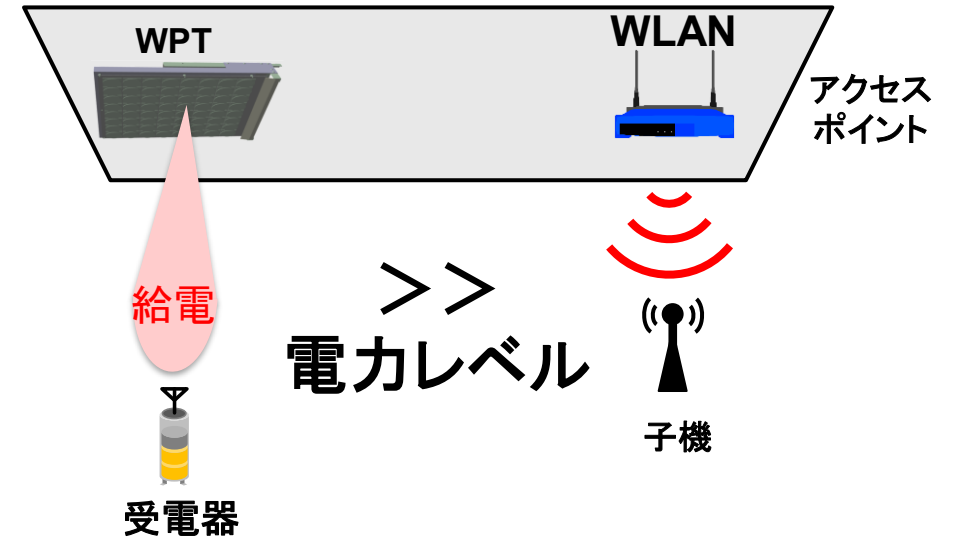
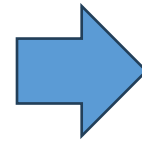
- ピンポイントターゲットのため
検出が必要なケース
 - 動的ターゲットの際は追従機能も

何らかの方法で受電ターゲットの位置(給電経路(伝搬路))の検出要

マイクロ波電給電を行う際の課題3



- 大電力・高利得システム



- 給電周波数 5.7GHz帯
 - 無線LAN(W56バンド)への影響大
 - 無線LANはどこにいるかわからない

近傍周波数帯で用いる無線LAN機器への影響発生

アジェンダ

- 01 マイクロ波を用いた遠隔給電概要
- 02 給電システムの基本構成と課題
- 03 課題を解決する給電装置の提案
- 04 まとめ

アジェンダ

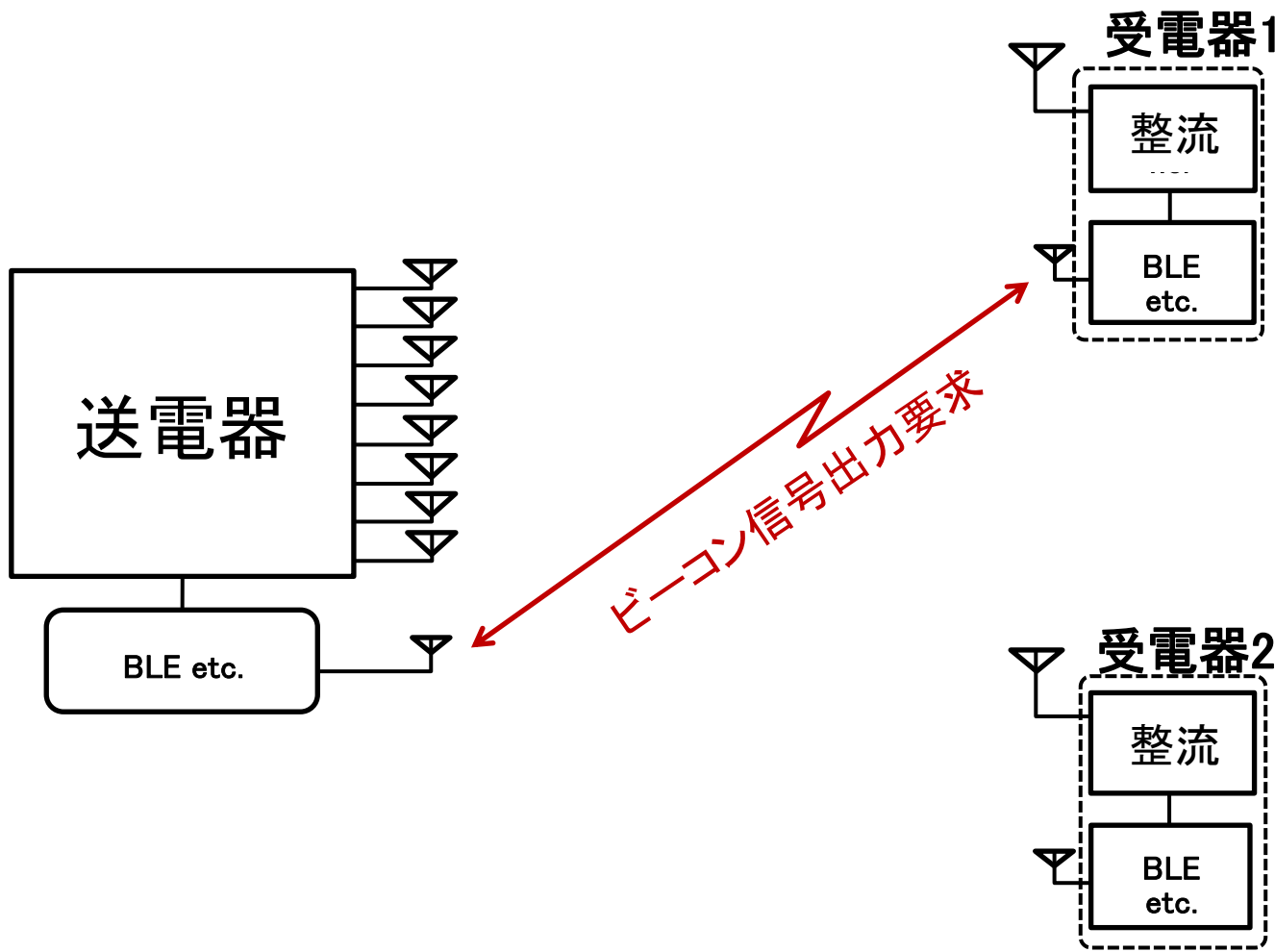
01 マイクロ波を用いた遠隔給電概要

02 給電システムの基本構成と課題

03 課題を解決する給電装置の提案

- 移動体への給電及び無線LANとの共存手法
- 従来のビームフォーミングシステムの課題
- 課題を解決する構成の提案
- 試作及び評価結果

移動体への給電手法

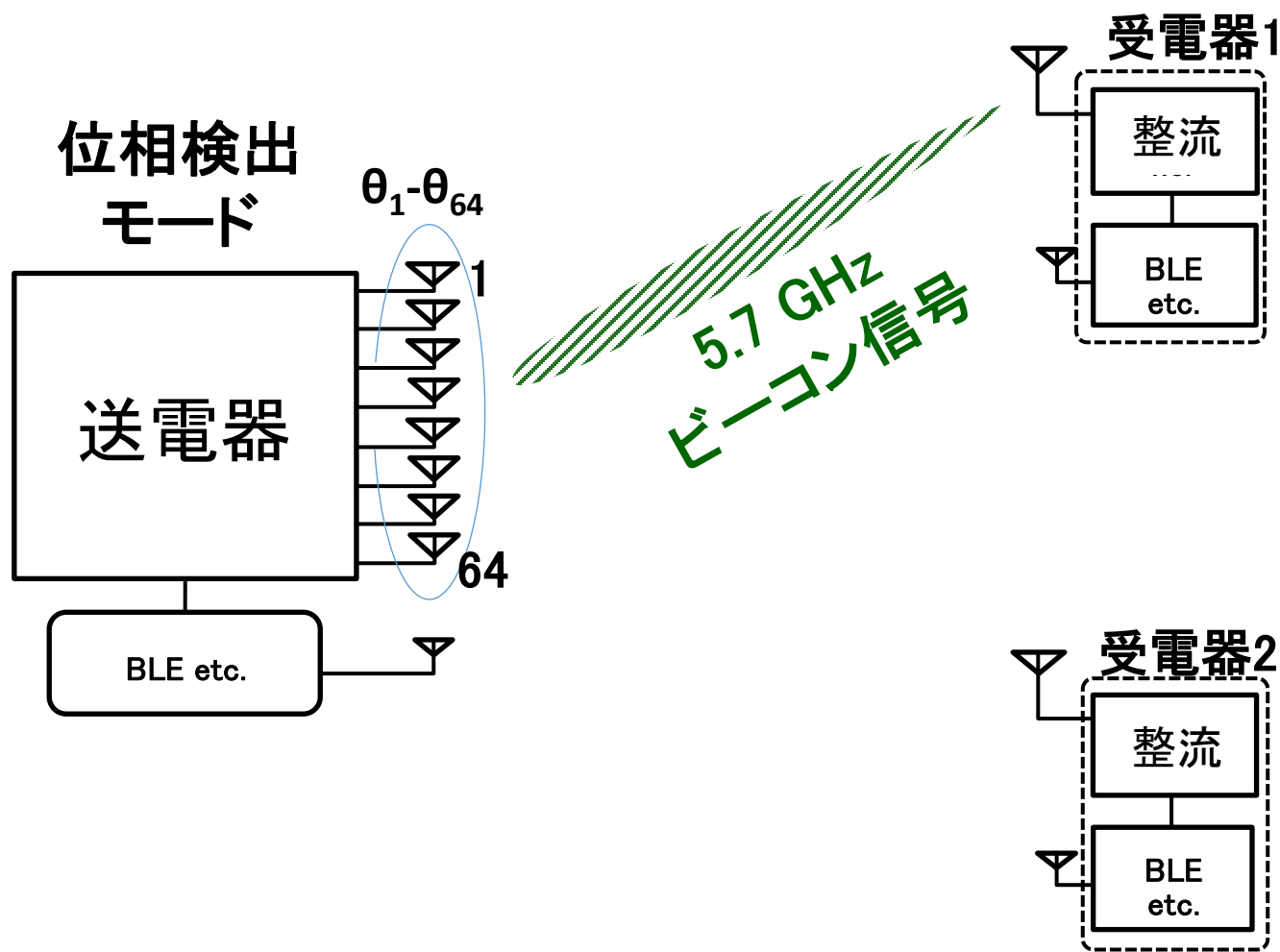


■ WPT送受電間

- Bluetooth Low Energy(BLE)により相互接続
- WPT送電器よりビーコン信号出力要求送信

2.4GHz帯等給電と異なる通信で送受電器間が接続

移動体への給電手法2

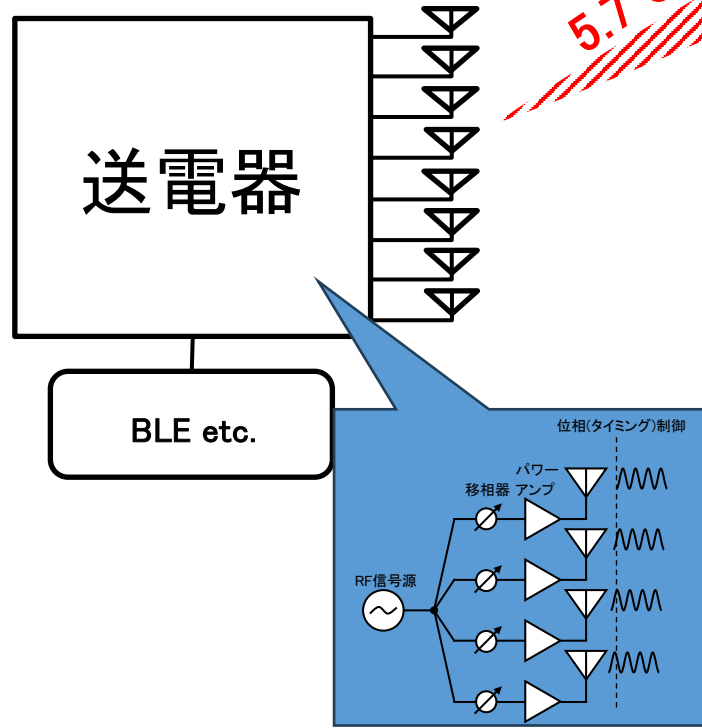


- 5.7GHzの微弱ビーコン信号を受電側から送信
 - 給電信号と同一周波数
- 送電器の送電アレイアンテナ毎に信号の位相を検出
- 位相検出結果から伝搬路情報が得られる

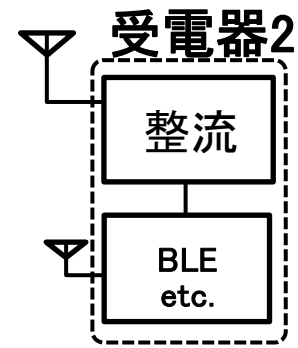
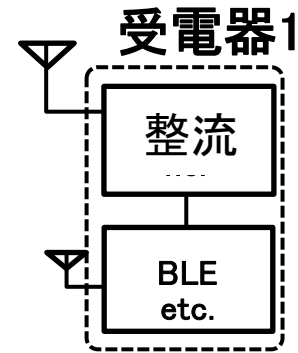
送電器が受信機能を持ち・受電からのビーコン信号で方向(伝搬路)を示す位相取得

移動体への給電手法3

移相重みづけ実施



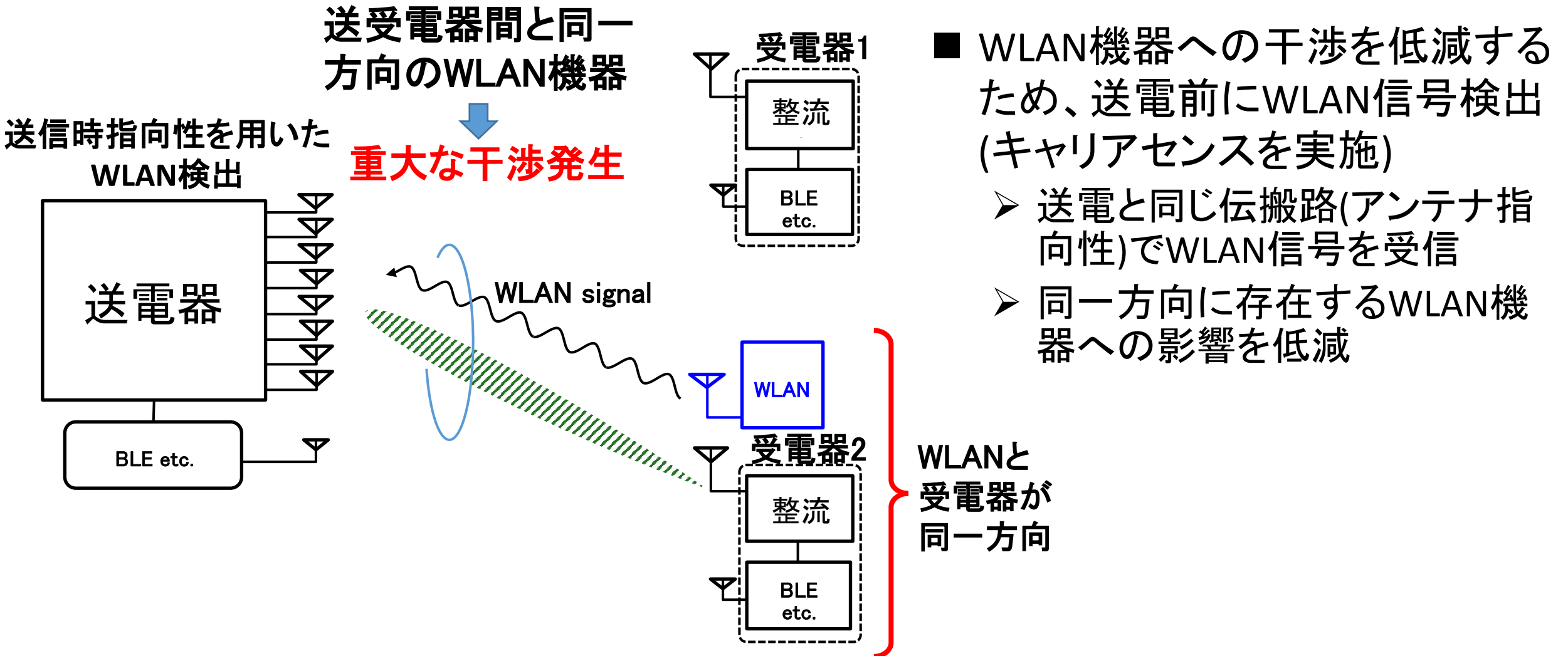
5.7 GHz 送電ビーム



- 位相検出結果から送電用移相情報(重みづけ)が決定される
 - 検出結果の複素共役
- 受電器の位置に応じたビーム生成を実施

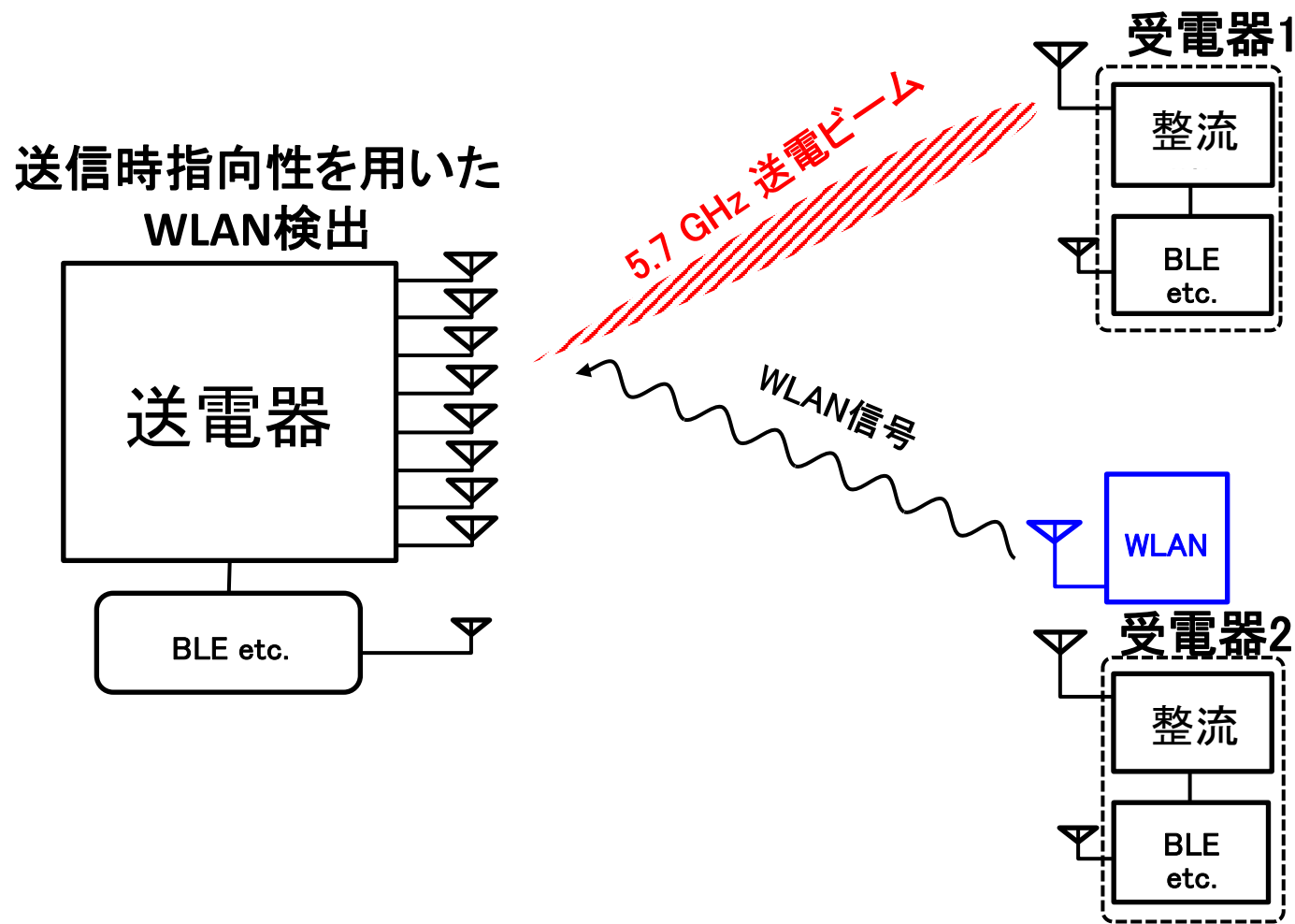
ビーコン信号の位相検出により位置検出 & 受電ターゲット追従実現

無線LANとの共存1



WLAN機器(特に受電器と同一方向)の検出実施

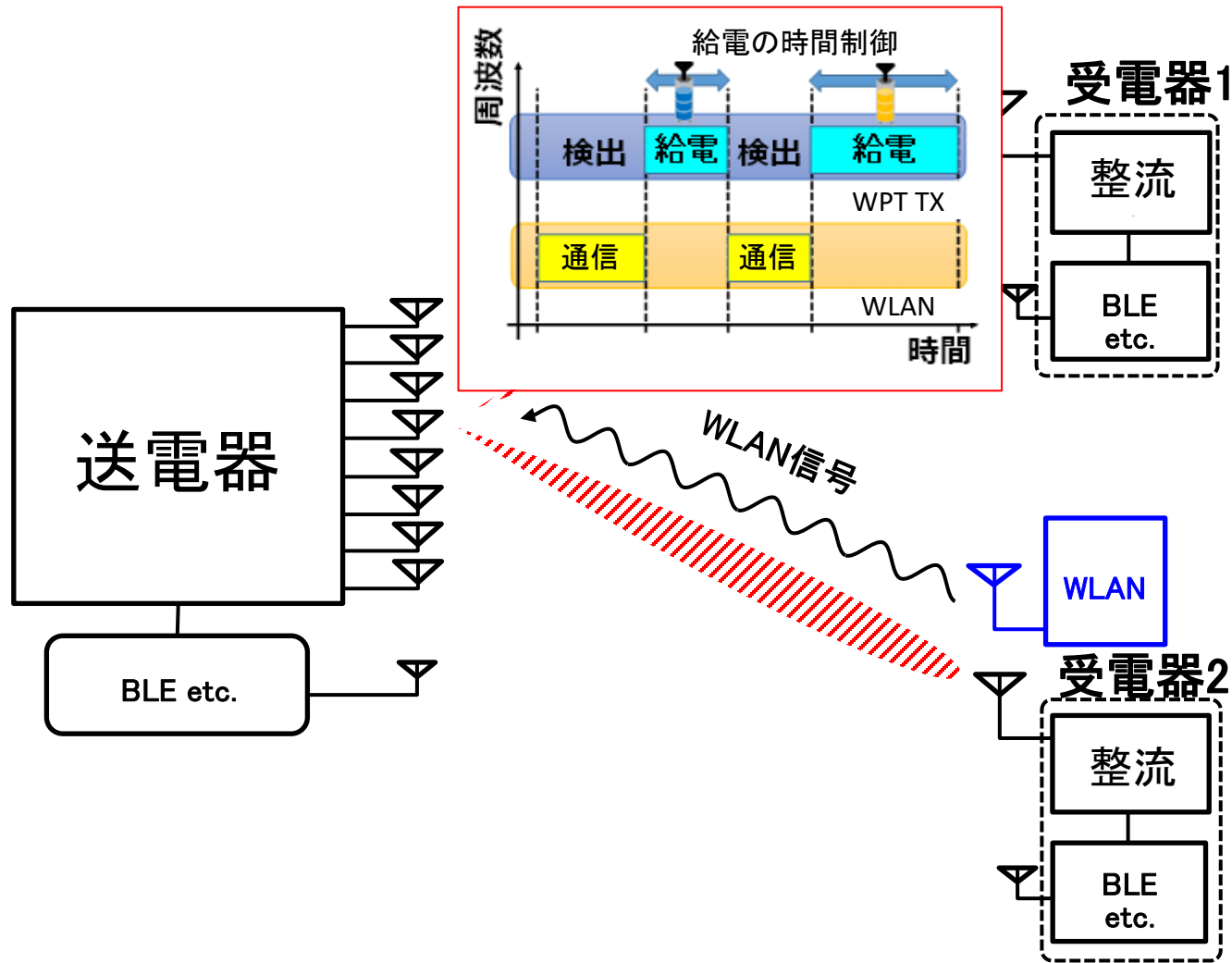
無線LANとの共存2



- WLAN機器への干渉を低減するため、送電前にWLAN信号検出(キャリアセンスを実施)
 - 送電と同じ伝搬路(アンテナ指向性)でWLAN信号を受信
 - 同一方向に存在するWLAN機器への影響を低減
- WLAN信号検出時は受電ターゲットを別の方向に変更

指向性制御によりWLAN機器への干渉を低減可能

無線LANとの共存3



- WLAN機器への干渉を低減するため、送電前にWLAN信号検出(キャリアセンスを実施)
 - 送電と同じ伝搬路(アンテナ指向性)でWLAN信号を受信
 - 同一方向に存在するWLAN機器への影響を低減
- その他の回避としてWLAN信号検出時は停波、非検出時に給電を実施

時分割制御によってもWLAN機器への干渉を低減可能

アジェンダ

01 マイクロ波を用いた遠隔給電概要

02 給電システムの基本構成と課題

03 課題を解決する給電装置の提案

- 移動体への給電及び無線LANとの共存手法
- 従来のビームフォーミングシステムの課題
- 課題を解決する構成の提案
- 試作及び評価結果

給電装置に必要な機能

■ ビーコン信号の位相検出機能

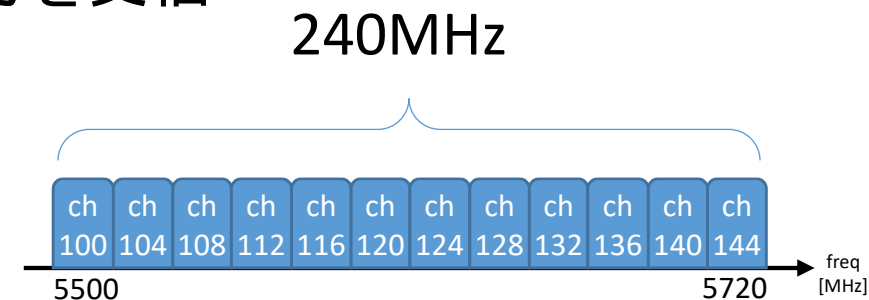
- 各64アンテナで受信、位相を検出する必要

■ ビームフォーミング(送信)

- 32Wの出力電力
- **64チャンネルで実現**
 - 500mW(27dBm)/chとなり、低価格なWLAN向けパワーアンプが適用可能

■ ビームフォーミング(受信)

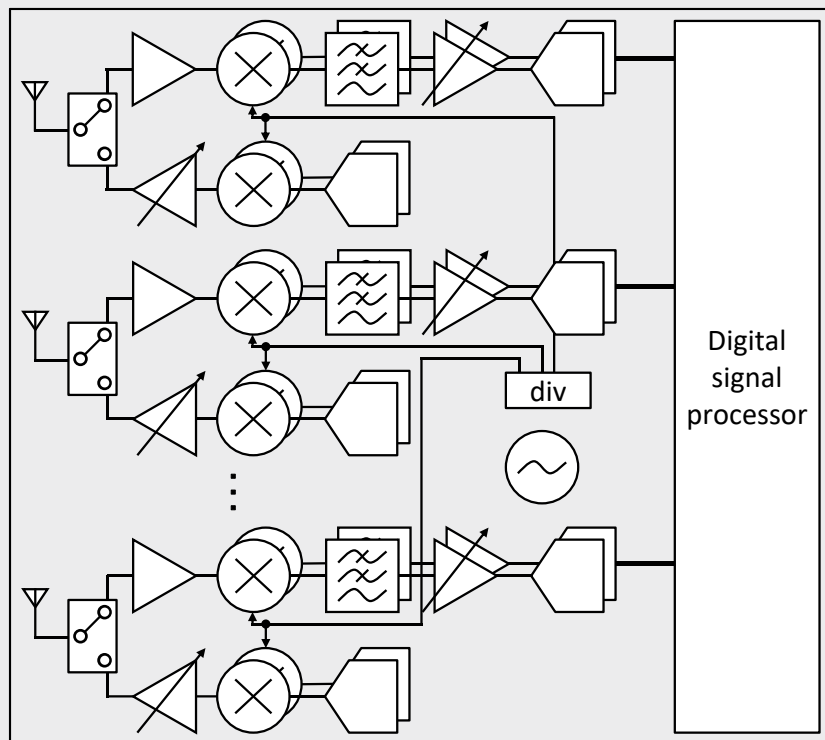
- 給電の前に送信と同じ重みづけ(指向性)でWLAN信号を受信
- WLAN信号を検出できる必要
- **W56バンド全域の受信** (5490 – 5730 MHz) が必要
⇒ 高コスト部品(ADコンバータ・信号処理部)要



ビームフォーミング(送受かつ広帯域)、位相検出機能が必須

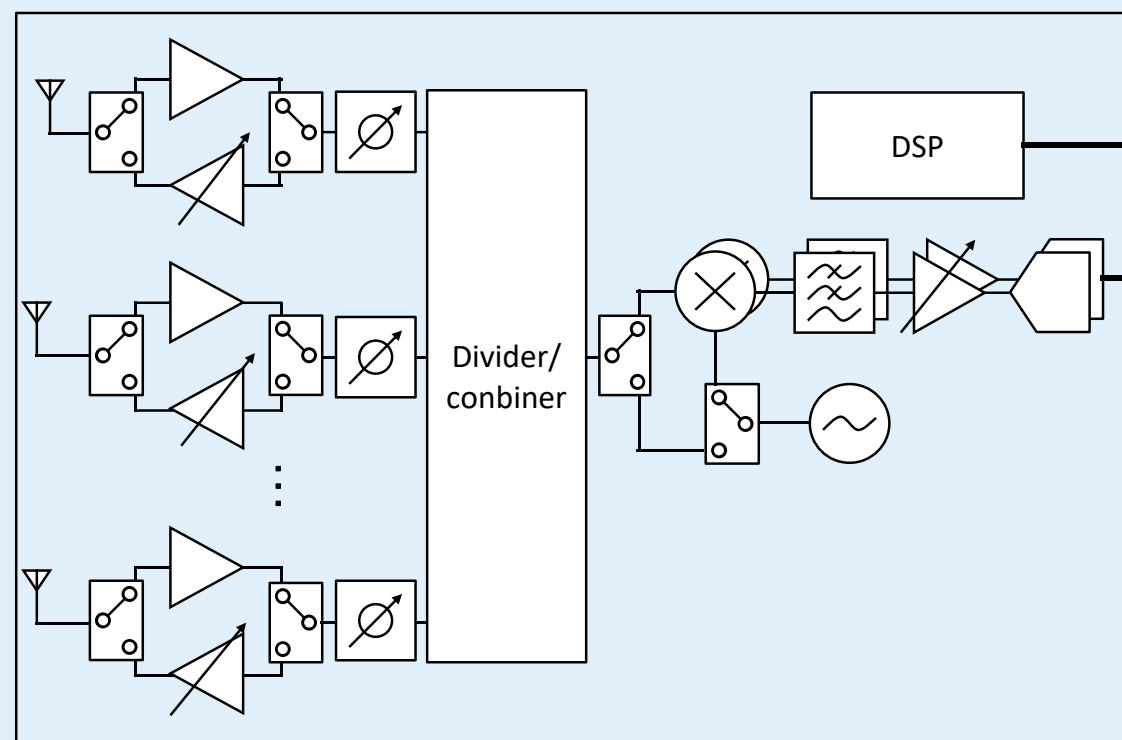
一般的なビームフォーミングシステム構成とその課題

デジタルビームフォーミング方式



- 全受信信号をデジタル化
- デジタル演算ビームフォーミングで実施

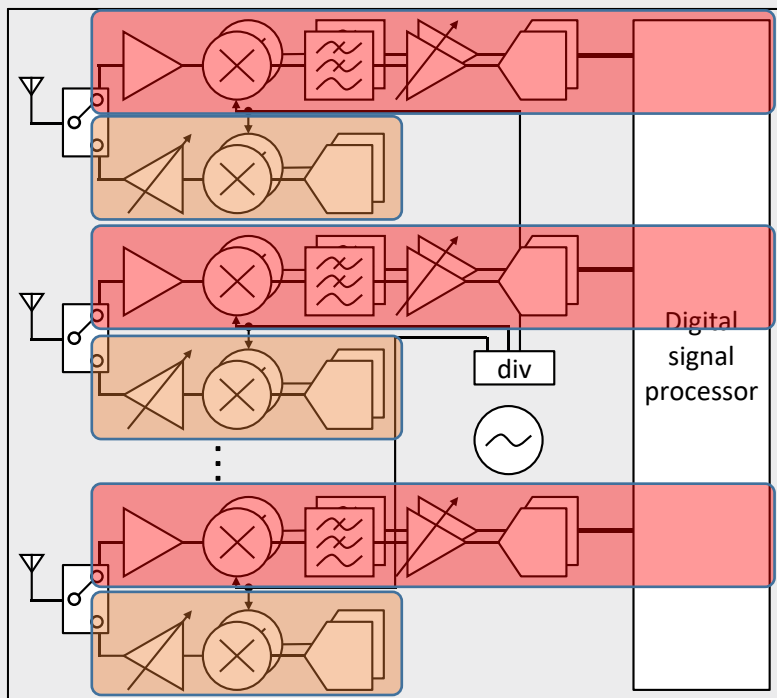
アナログビームフォーミング方式



- 全受信信号をアナログ合成器で合成
- 合成後の信号をデジタル変換して処理
- 移相器・合成/分配器は送受共通

一般的なビームフォーミングシステム構成とその課題

デジタルビームフォーミング方式

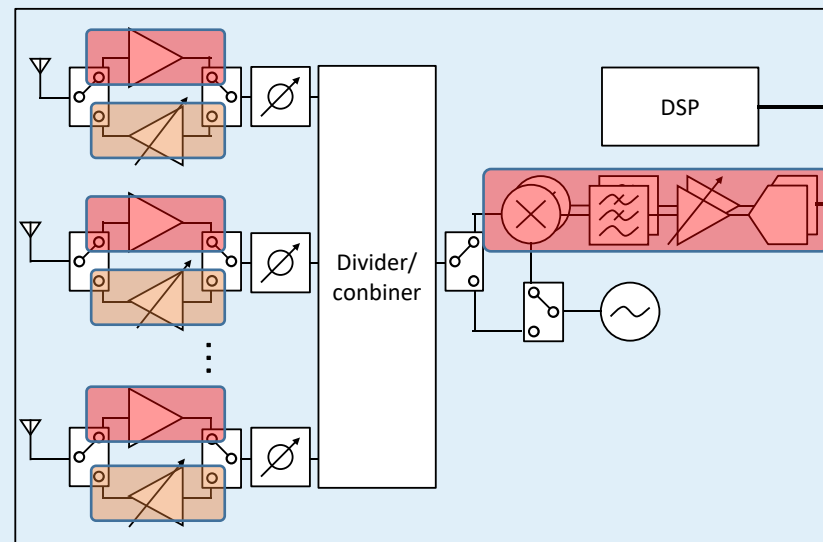


受信パス

送信パス

- ☺ビームフォーミング・位相検出どちらも可能
- ☹高コスト
⇒全チャネル分の受信回路・高速信号処理

アナログビームフォーミング方式



受信パス

送信パス

- ☺低コスト
⇒受信系が1系統のみ
- ☹アンテナ毎の位相検出不可能

アジェンダ

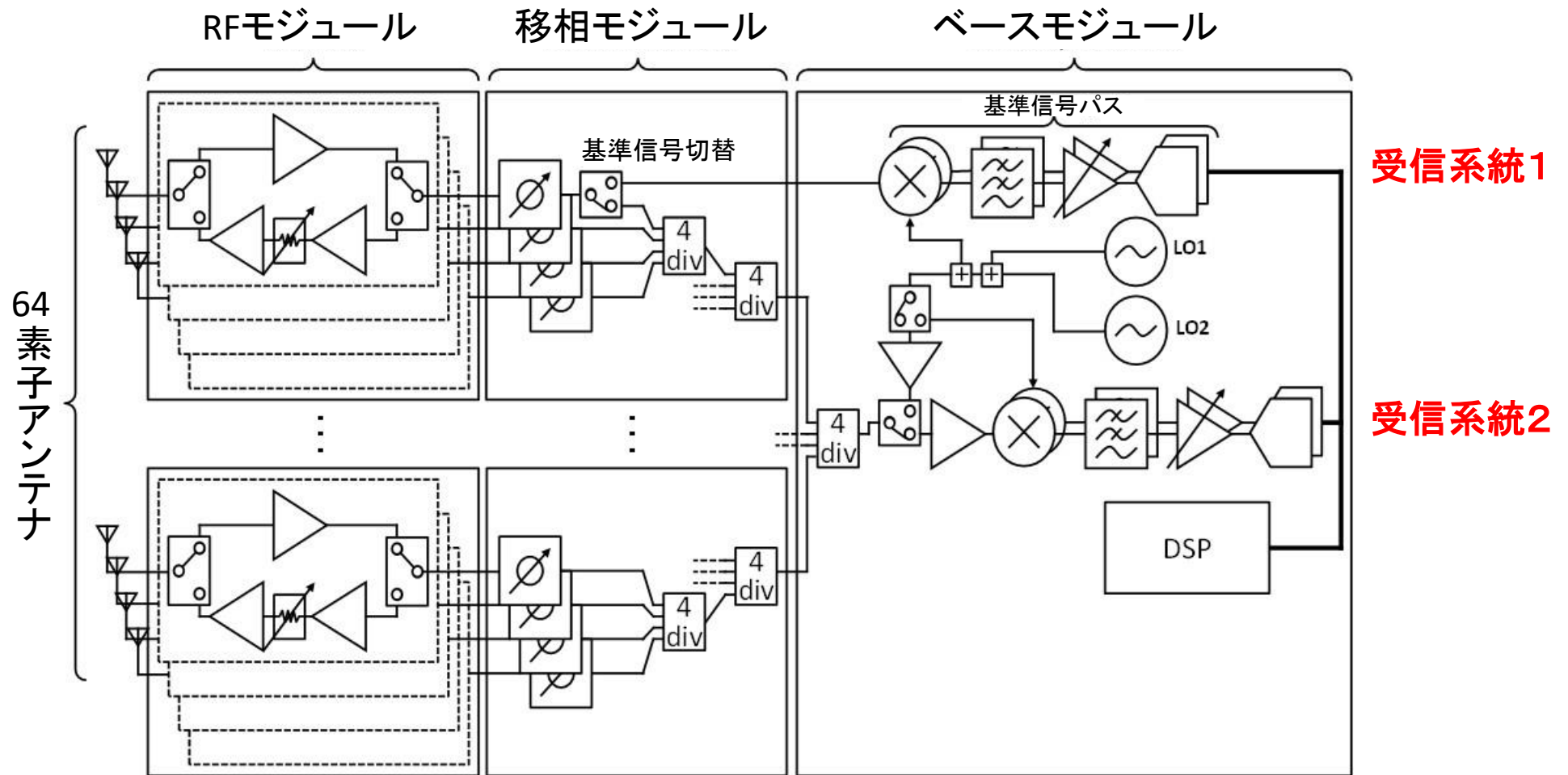
01 マイクロ波を用いた遠隔給電概要

02 給電システムの基本構成と課題

03 課題を解決する給電装置の提案

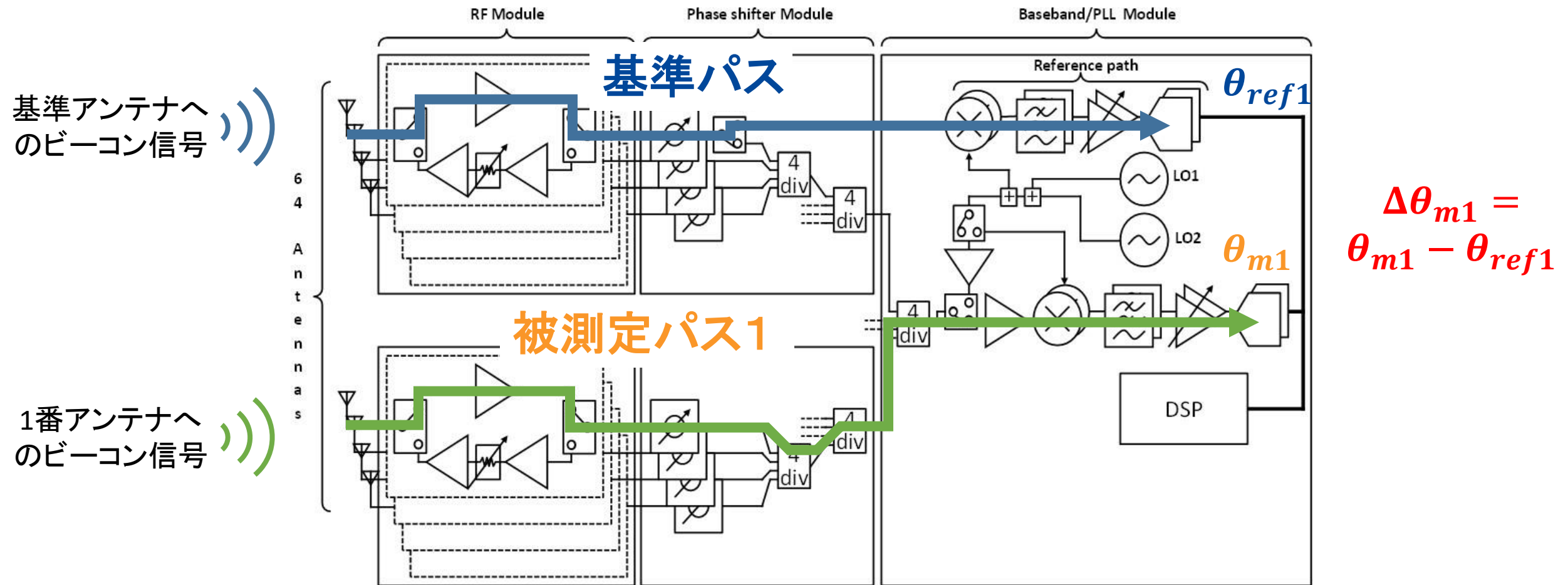
- 移動体への給電及び無線LANとの共存手法
- 従来のビームフォーミングシステムの課題
- **課題を解決する構成の提案**
- 試作及び評価結果

提案アーキテクチャ(アナデジハイブリッド方式)



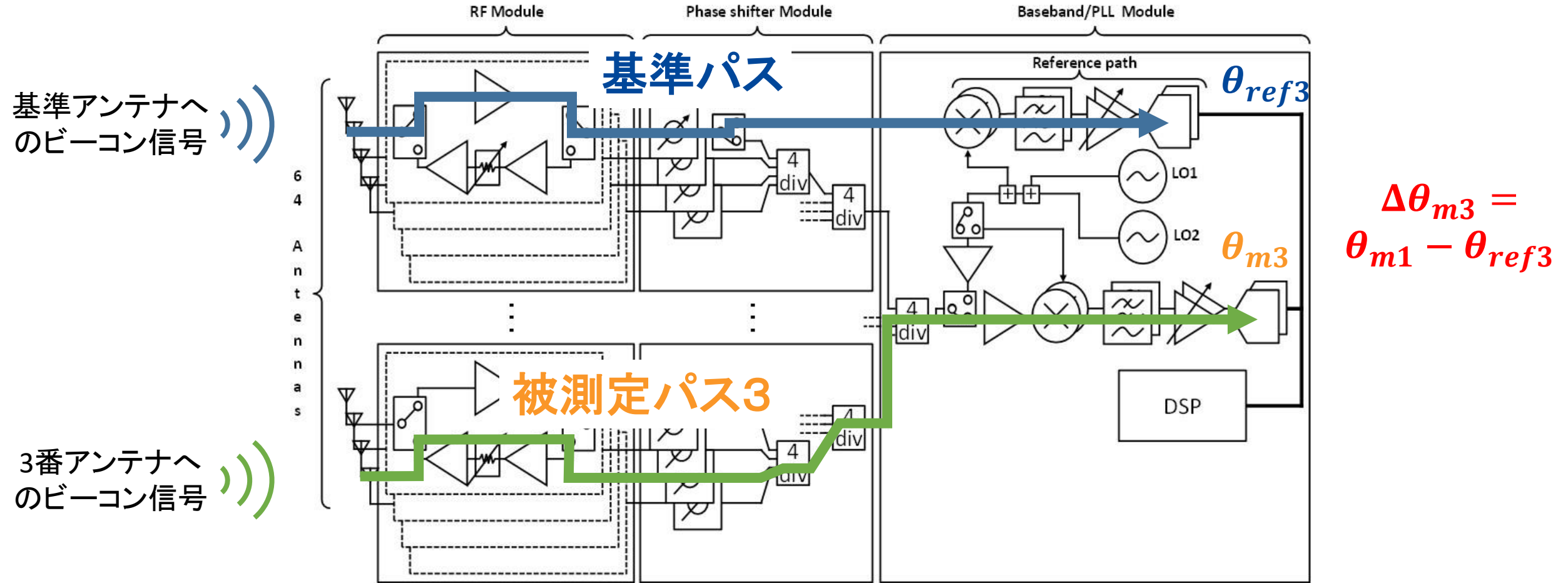
受信信号処理は2系統のみの構成⇒デジタル方式に対し大幅低コスト化

①提案方式によるビーコン信号の位相検出



- アンテナ位置固定の基準パスとその他のアンテナの被測定パスとの位相差を検出
 - 被測定パス以外のアンテナの受信系はOFF状態となる

①提案方式によるビーコン信号の位相検出

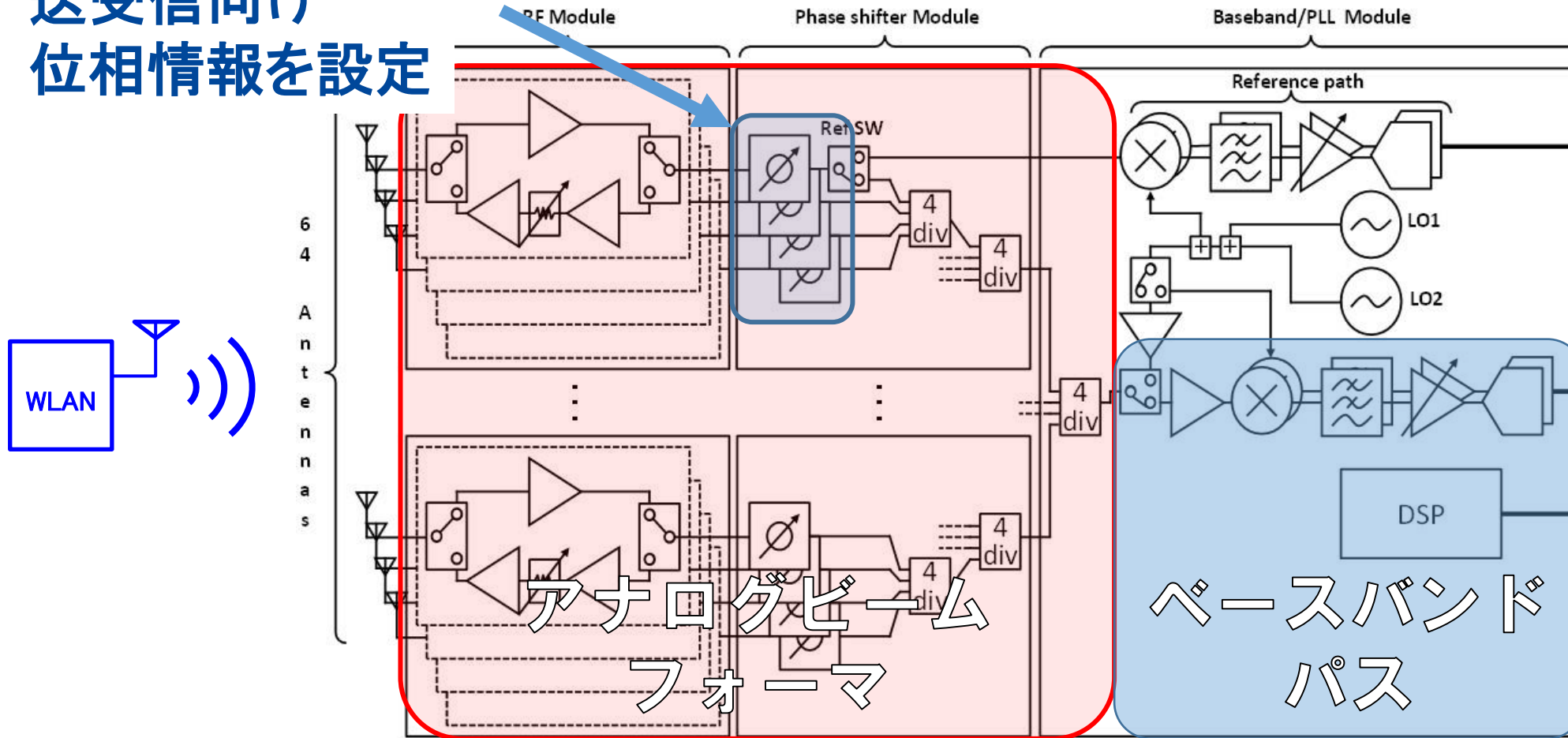


- 基準パスとその他のアンテナ(63個分)との位相差テーブルを作成

低コスト構成で位相信号検出可能

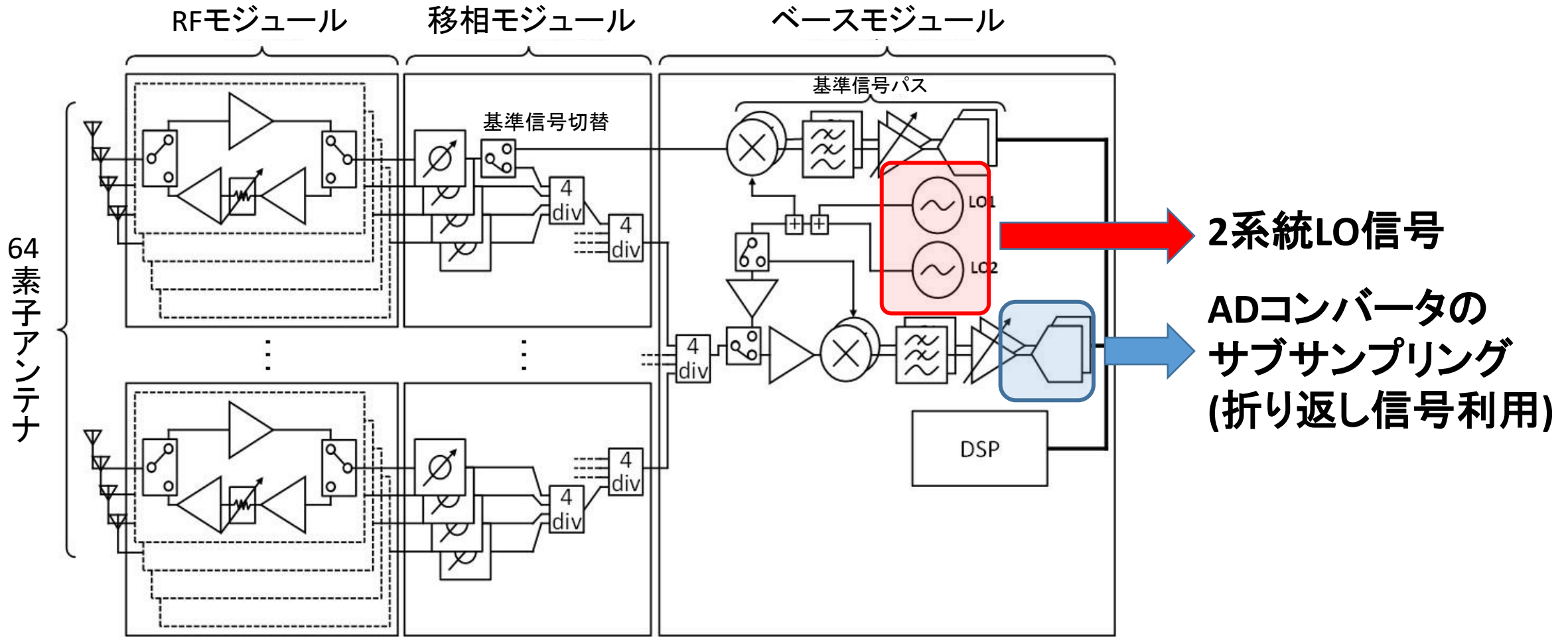
②提案方式による送受ビームフォーミング

送受信向け
位相情報を設定



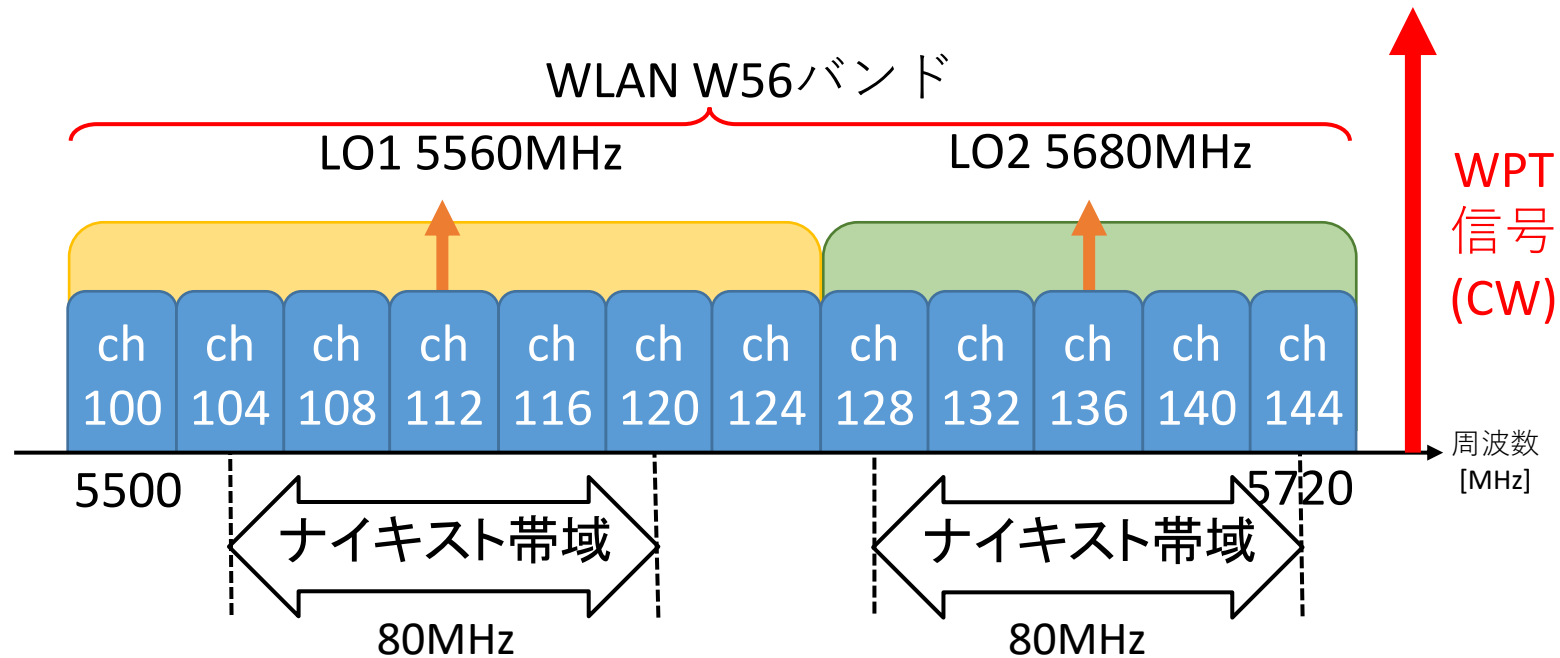
- ビーム信号生成及びWLAN信号受信はアナログビームフォーミング方式にて実現

③提案方式による広帯域WLAN信号の検出



上記の二つの手法で低コスト構成で広帯域受信を実現

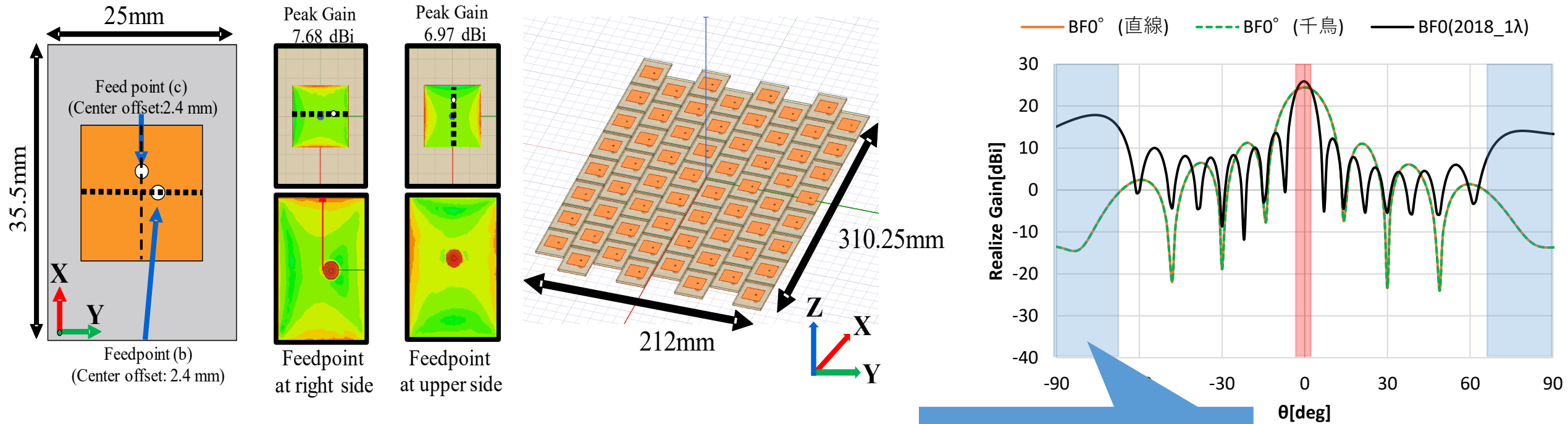
③提案方式による広帯域WLAN信号の検出



- 240MHzのW56バンド帯信号を一括受信可能な構成
- LO信号を2系統用いることにより、受信可能周波数帯を拡大
- ADコンバータのサブサンプリング(折り返し信号)の利用によりより広帯域な信号を受信

⇒一般的なWLAN受信(復調)回路としては利用不可能だが、検出のみなら利用可能

アンテナの小型化



■ 基板パターンを利用するパッチアンテナを適用

- アンテナ素子間隔を保ちつつグレーティングローブを低減する三角(千鳥)配置を採用

側面への漏れ(グレーティングローブ)低減

アンテナサイズをA4ペーパー程度に小型化

アジェンダ

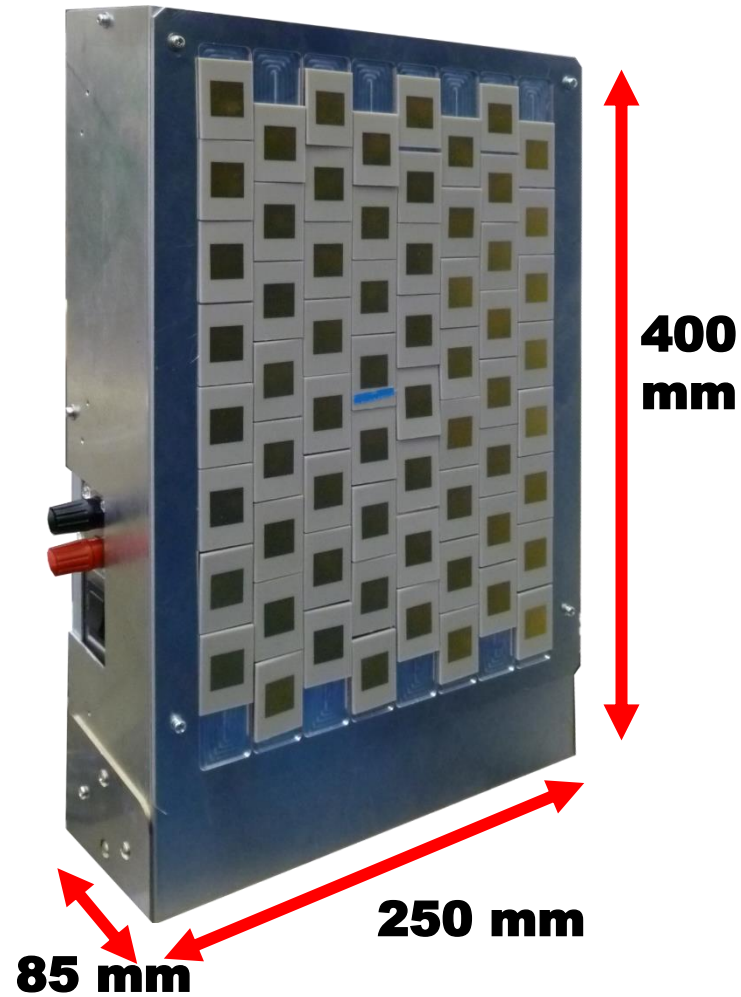
01 マイクロ波を用いた遠隔給電概要

02 給電システムの基本構成と課題

03 課題を解決する給電装置の提案

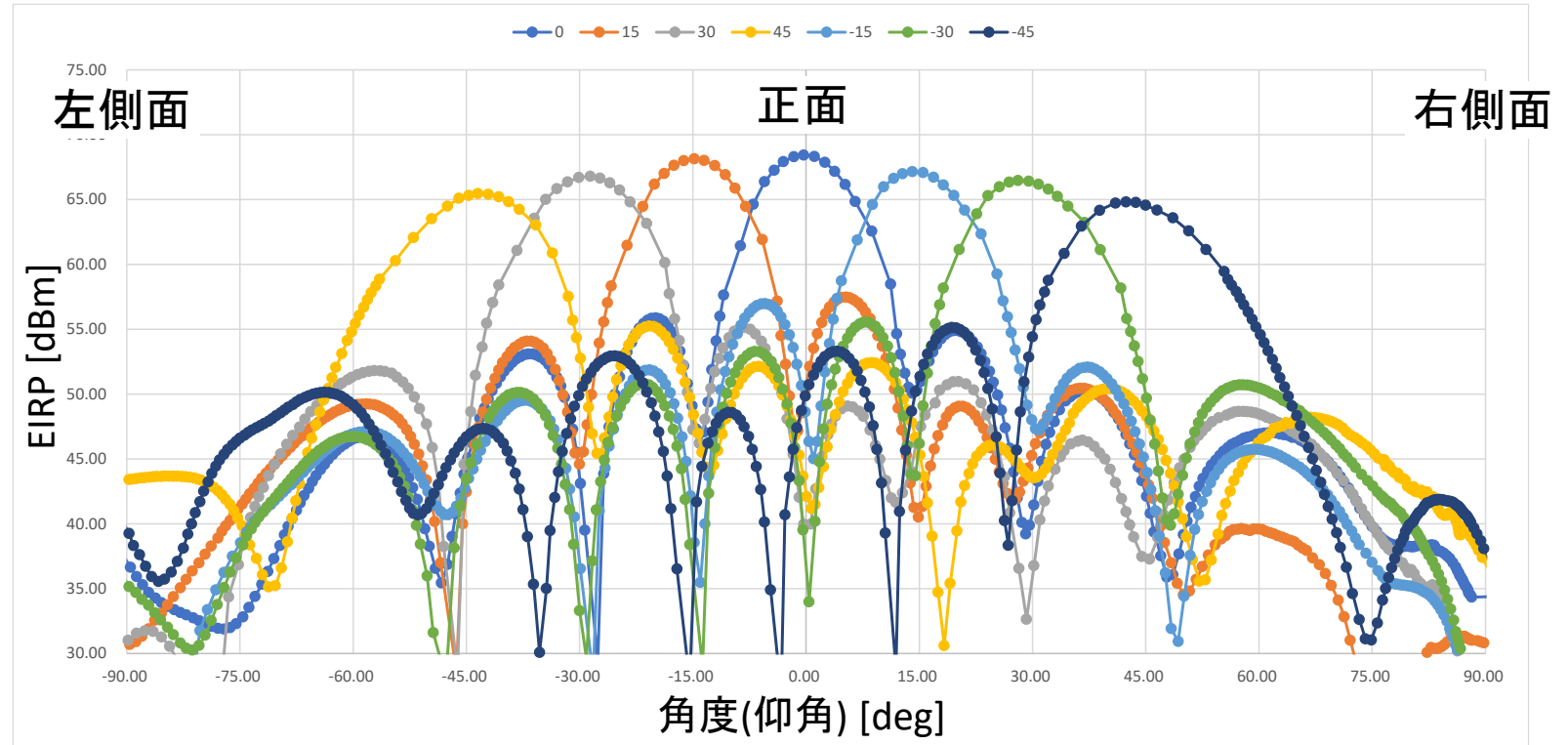
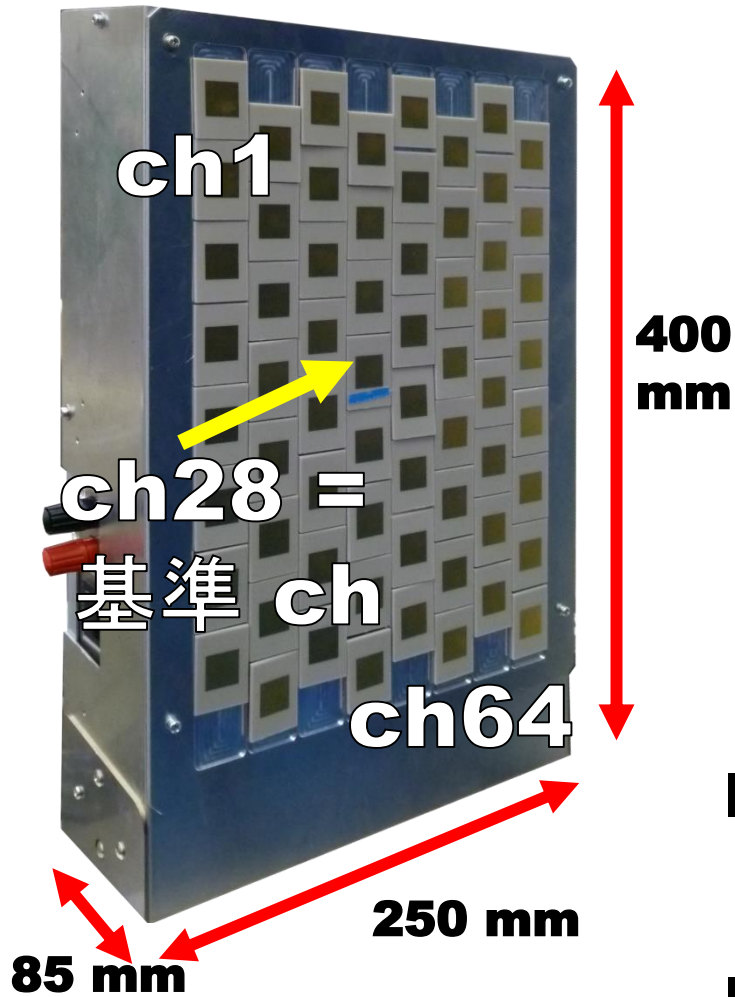
- 移動体への給電及び無線LANとの共存手法
- 従来のビームフォーミングシステムの課題
- 課題を解決する構成の提案
- **試作及び評価結果**

試作器及び送信ビームフォーミング特性



- 64個のアンテナ素子で必要ない利得かつビームフォーミング特性を確保
- 1素子当たり500mW(一般的な無線機相当)で32Wの総合出力

試作器及び送信ビームフォーミング特性

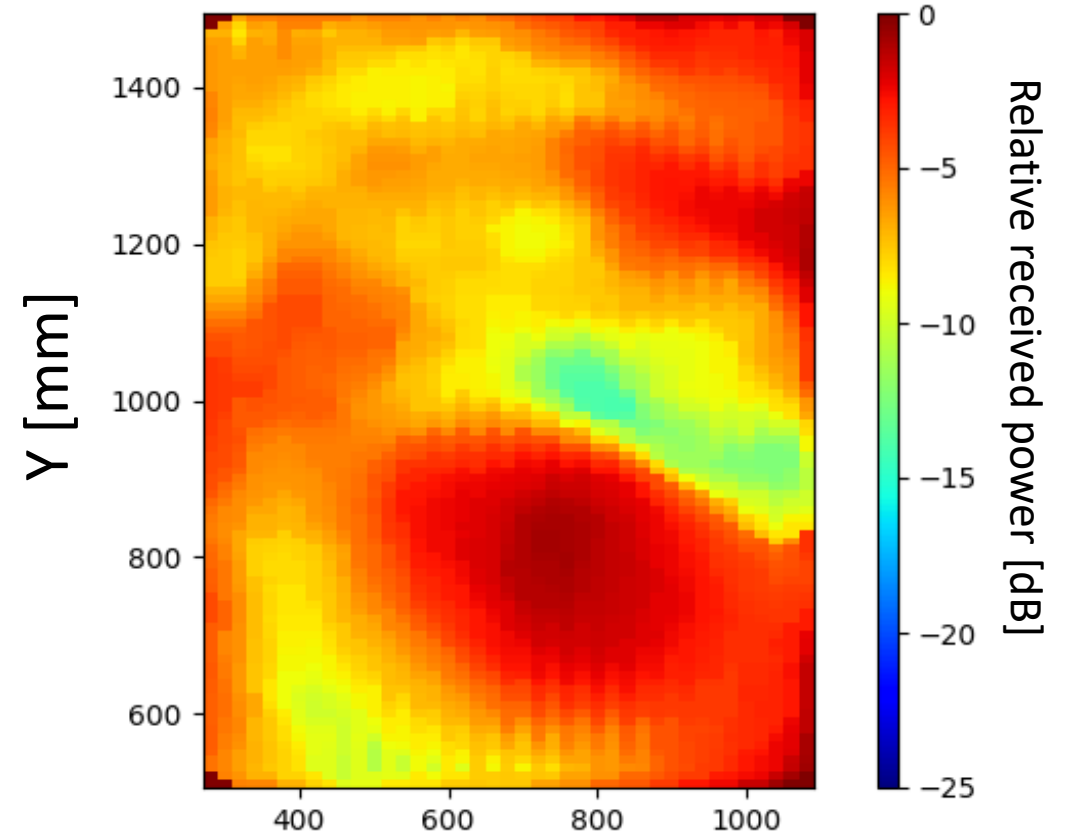
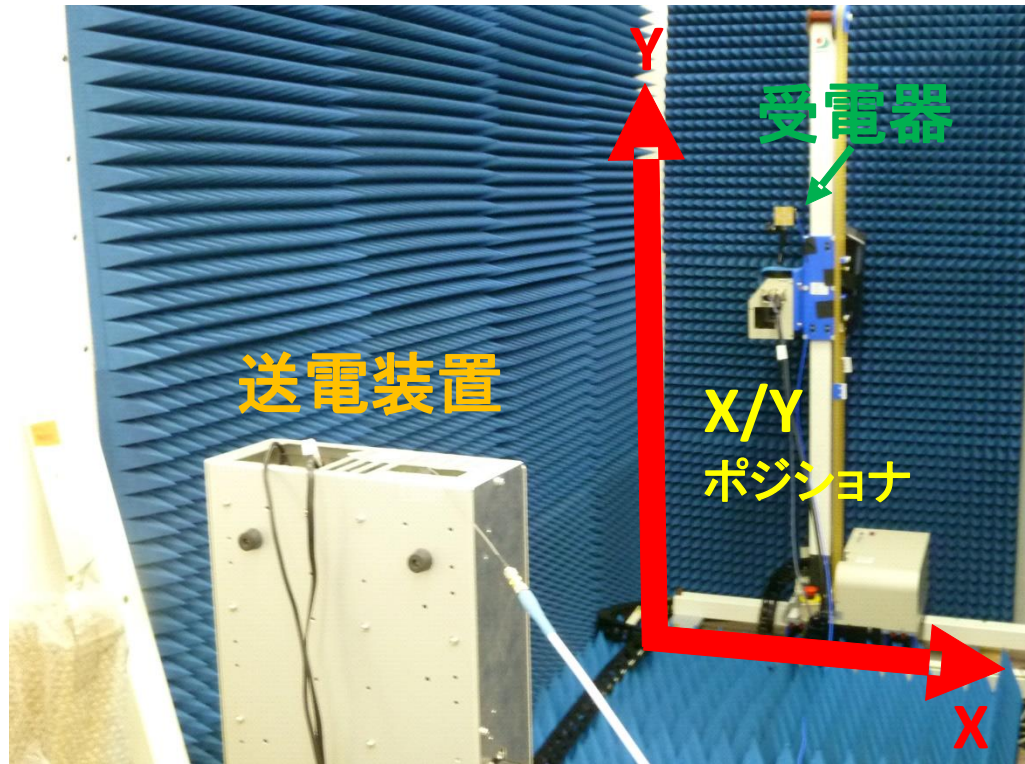


■ 2.5mの距離で測定を実施

➤ EIRP約70dBmを達成

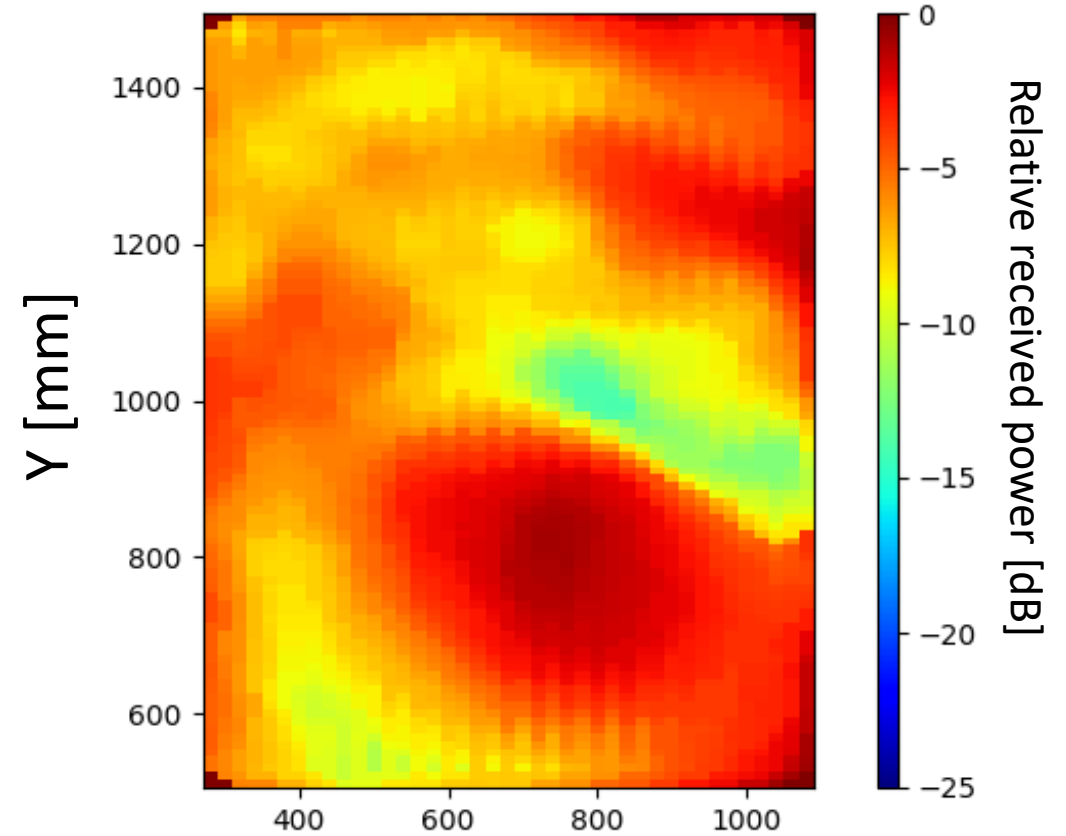
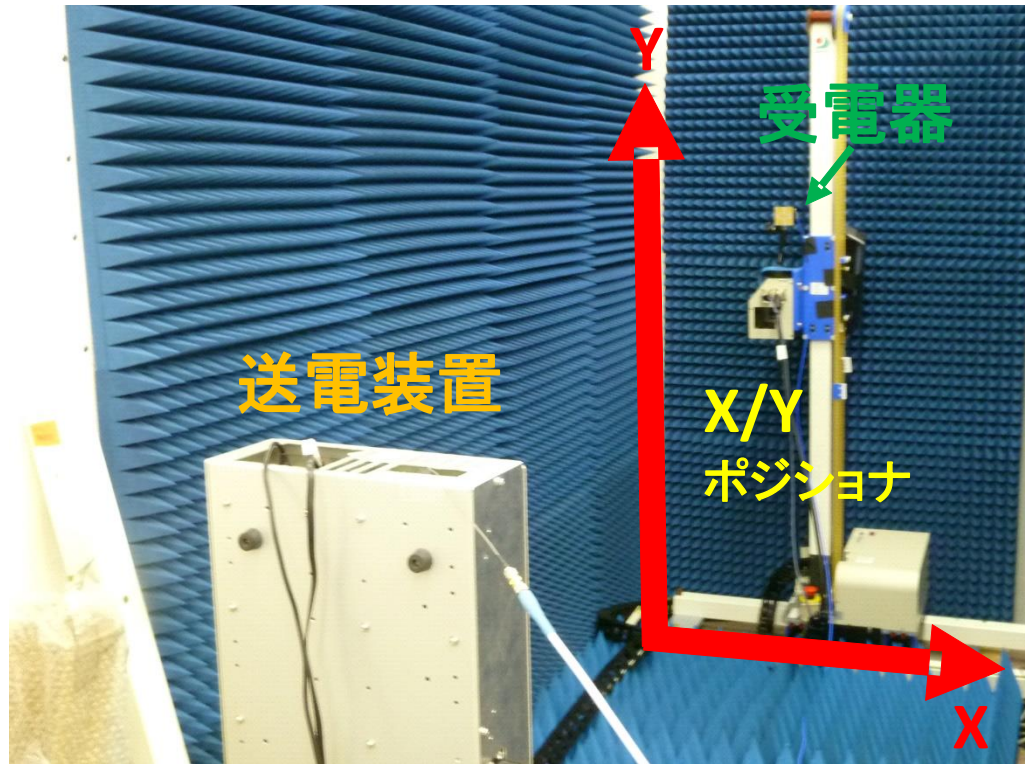
■ 64素子アンテナによるビームフォーミング機能を確認

受電ターゲット追従機能測定



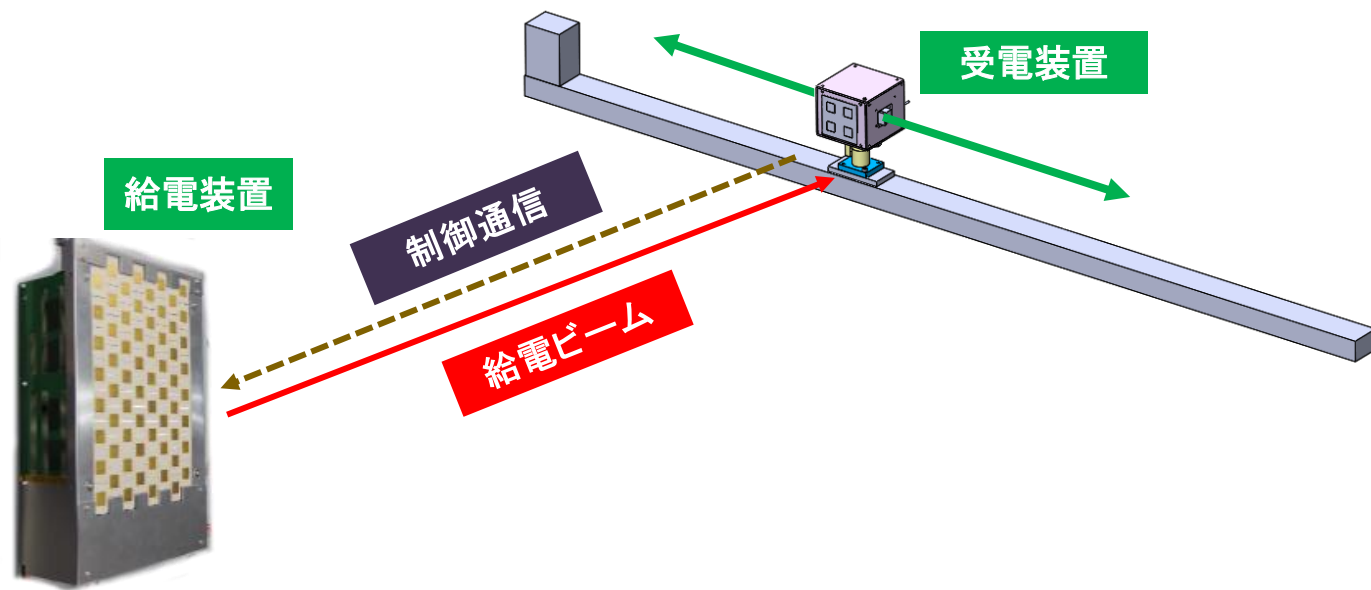
- 受電器位置をポジショナで変更し、給電電力を測定
- 位置に追従して給電実施することを確認

受電ターゲット追従機能測定

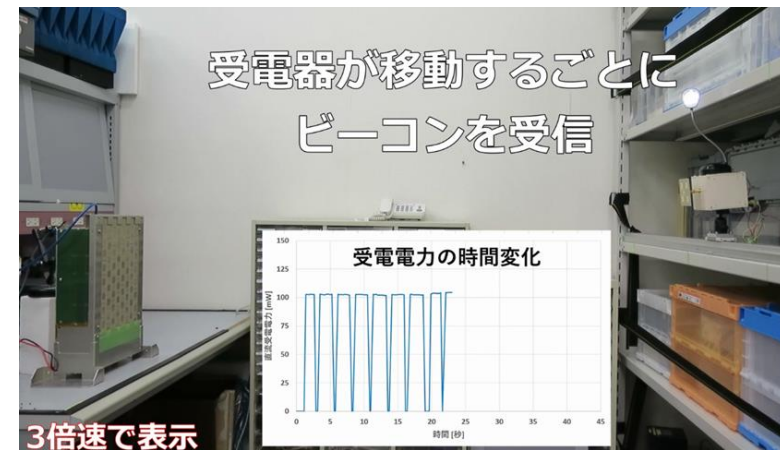


- 受電器位置をポジショナで変更し、給電電力を測定 X [mm]
- 位置に追従して給電実施することを確認

受電ターゲット追従機能デモンストレーション



受電器が移動するときの最適ビームフォーミングデモ実施



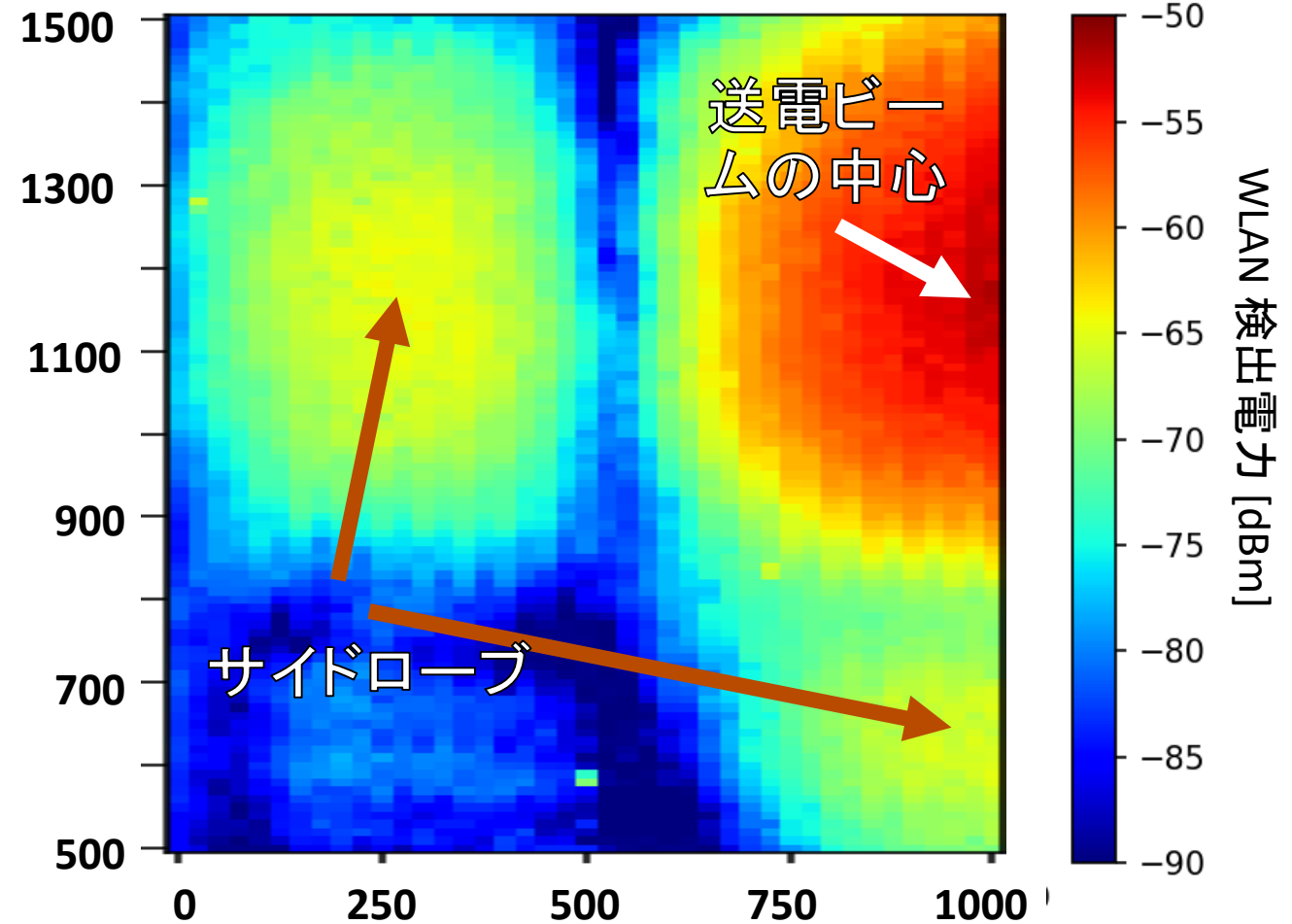
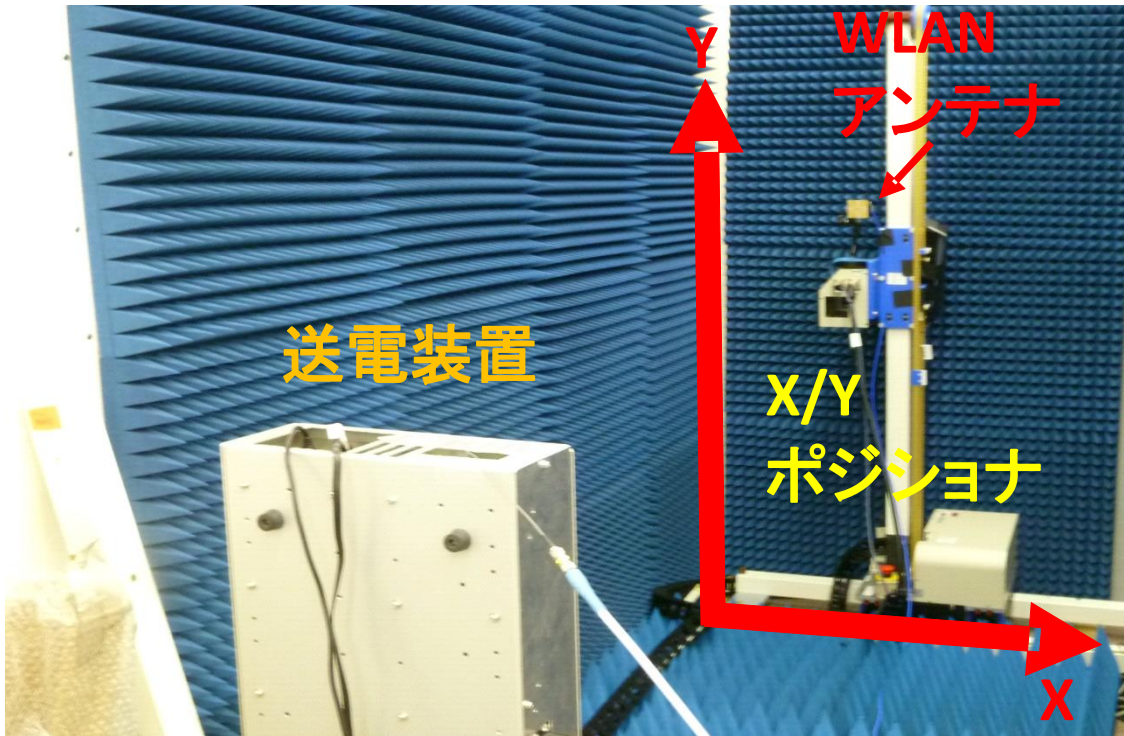
ビーコンを用いた受電ターゲットのトラッキングあり



ビーコンを用いた受電ターゲットのトラッキングなし

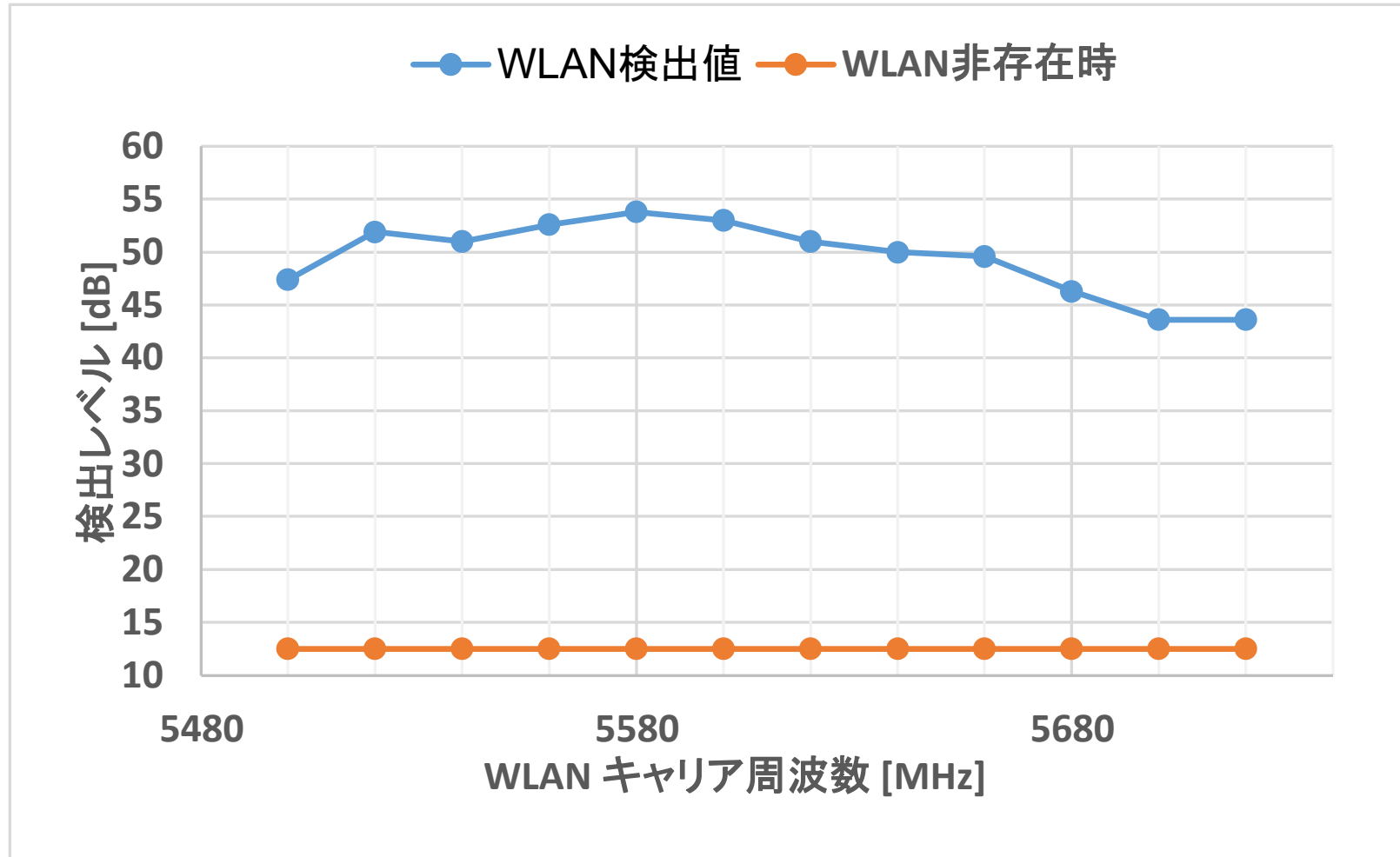
送受信を繰り返すことで動的追従可能

WLAN信号検出



- WLANアンテナをポジショナに設置し、WLAN通信実施時の信号検出
- WLANアンテナが受電ターゲット近傍に設置された際にWLAN検出信号も最大化

W56バンド全体のWLAN信号受信



■ W56バンド全域のWLAN信号受信を確認

アジェンダ

- 01 マイクロ波を用いた遠隔給電概要
- 02 給電システムの基本構成と課題
- 03 課題を解決する給電装置の提案
- 04 まとめ

まとめ

- 完全ワイヤレスIoTを実現するWPTシステム
 - 受電ターゲット追従及びWLAN共存機能の必要性
 - 従来構成における課題の抽出
- 小型・低コストなアナデジハイブリッド方式の提案
 - ビーコン位相検出を2系統のベースバンド信号処理のみで実現
 - 広帯域無線LAN信号を一括受信する受信系の提案
- 測定結果より必要な機能が実現されていることを確認
 - 受電ターゲット追従機能及び広帯域WLAN信号受信を実現

謝辞

本研究の一部は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「IoE社会のエネルギーシステム」(管理法人:JST)によって実施されました

文献および著者紹介

- [1] T. Mitomo, K. Ban, K. Arai and K. Taniguchi, “Low-cost 5.7 GHz Wireless Power Transmitter with Automatic Target Tracking That Coexists with WLAN Systems,” IEEE 2023 Asia-Pacific Microwave Conference, pp.552-554, Taipei, Dec. 2023.
- [2] ITU-R : Recommendation SM.2151, “Guidance on frequency ranges for operation of wireless power transmission via radio frequency beam for mobile/portable devices and sensor networks”, https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.2151-0-202209-I!!PDF-E.pdf, 2022
- [3] Daniel Belo, et al, “A selective, Tracking, and Power Adaptive Far-Field Wireless Power Transfer System,” IEEE Trans. MTT, vol. 67, no. 9, pp. 3856-3866, Sept. 2019.
- [4] K. Murata, T. Mitomo, M. Higaki, K. Onizuka, “A 5.8-GHz 64-Channel Phased Array Microwave Power Transmission System Based on Space-Time Beamforming Algorithm for Multiple IoT Sensors”, in European Microwave Conference (EuMC), 2018, pp. 170-173.
- [5] K. Arai, K. Wang, T. Mitomo, M. Higaki, K. Onizuka, “A Tile-based 8×8 Triangular Grid Array Beamformer for 5.7 GHz Microwave Power Transmission”, in IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), 2021, pp. 101-104

- 三友 敏也 株式会社東芝 総合研究所 研究主幹 toshiya.mitomo@toshiba.co.jp
- 荒井 和輝 株式会社東芝 総合研究所 kazuki1.arai@toshiba.co.jp
- 坂 耕一郎 株式会社東芝 総合研究所 上席研究員 koichiro.ban@toshiba.co.jp
- 谷口 健太郎 株式会社東芝 総合研究所 シニアマネージャー kentaro.taniguchi@toshiba.co.jp