

通信障害に強い無線通信ネットワークの製造現場適用化研究（第1報）

Research of wireless communication network tolerant to network disturbances for applying manufacturing site.

電子・機械技術部 電子・情報科 柿崎正貴 鈴木健司

製造現場における LPWA 無線通信特性を明らかにするため、Wi-SUN FAN の通信性能を評価した。障害物の無い環境における電波伝搬特性として、送受信アンテナ間距離に対する受信信号強度を測定し、電波伝搬の距離減衰特性を明らかにした。また、受信信号強度に対するパケットエラーレートを測定した結果、データレート設定 50[kbps] の場合、RSSI が -88[dBm] 以上で安定した通信が可能であること、及びデータ長 4[byte]、データ送信間隔 1[s] における安定通信可能な距離は、アンテナ高さ 6.0[m] において約 2,373[m]、アンテナ高さ 1.8[m] において約 455[m] であることが分かった。

Key words: 無線通信、ネットワーク、LPWA、Wi-SUN FAN

1. 緒言

急速にデジタル変革 (Digital Transformation, DX) が加速するなか、製造業では DX による生産性向上が急務である。一方で、製造業の DX においては、工場内の通信インフラ未整備の課題がある。

通信インフラの要となる情報ネットワークの構築には、Wi-Fi (無線 LAN) や有線ケーブル (有線 LAN) が広く利用される。しかし、Wi-Fi は設置が容易で高速なデータ伝送が可能な反面、電波到達距離が短く、通信範囲が限定される点や、障害物による電波遮蔽や電磁ノイズによる干渉を受けて、通信が不安定になる点が課題である。一方、有線ケーブル敷設は通信安定性・信頼性が高いうえ、高速なデータ伝送が可能だが、配線の取り回しを考慮した工場内の機器配置変更や製造ラインの再編成が必要となる等、導入障壁が高いことが課題である。

そこで近年注目されているのが、長距離通信可能で電波遮蔽や干渉に強いとされる 920MHz 特定小電力無線 (Low Power Wide Area, LPWA) である。表 1 のように、LPWA の通信規格は多数存在し、通信距離や通信速度等の仕様がメーカーから提示されている。しかし、製造現場等の障害物や電磁ノイズの多い環境下における通信性能は提示されていない。

本研究では、LPWA 無線通信を製造現場へ適用するための指針を得るため、障害物のある環境等における電波到達性や通信の安定性・耐障害性を評価し、製造現場における LPWA 無線の通信特性を明らかにする。さらに、LPWA を用いた無線通信 IoT システムを構築し、実際の製造現場へ導入することで、実現場におけるシステム安定性や耐障害性を評価する。

2. 概要

2. 1. 無線規格の選定

製造現場の無線通信利用において考慮すべき事項と

表 1 主な LPWA 通信規格とスペック

規格	LoRaWAN	Wi-SUN	Wi-Fi HaLow	Sigfox	ELTRES	NB-IoT
通信距離	< 15 km	< 1 km	< 1 km	< 50 km	< 100 km	< 20 km
通信速度	< 50 kbps	< 300 kbps	< 1.0 Mbps	< 0.1 kbps	< 128 bit/min	< 100 kbps
種別	自営網/ 公衆網	自営網	自営網	公衆網	公衆網	公衆網
仕様	公開	公開	公開	非公開	非公開	非公開

して、コストとつながりやすさ (通信の安定性) が挙げられる。これらの観点から、本研究では LPWA 無線規格のうち、アンライセンスバンドである Wi-SUN FAN、Wi-Fi HaLow (IEEE 802.11ah)、LoRa (LoRaWAN, PrivateLoRa) の 3 つを選定し、評価することとした。

Wi-SUN FAN は、マルチホップ通信によるメッシュネットワークが特徴で、冗長性・耐障害性が高いネットワークを構築できる。Wi-Fi HaLow は、Wi-Fi と同じ通信プロトコル等を使用しているため、Wi-Fi との親和性が高く、既に Wi-Fi が整備された工場等における無線通信ネットワークの拡張において有用である。LoRa は、独自の変調方式により耐干渉性が高く、長距離通信に適した規格である。

本報では、Wi-SUN FAN の通信性能評価として、障害物の無い理想的な環境下における電波伝搬特性と、受信信号強度に対する通信特性評価の結果について記す。

2. 2. 無線モジュール

無線モジュールとして、ローム (株)BP35C5¹⁾ を搭載した USB 基板²⁾ ((株)日新システムズ製) に、 $\lambda/2$ ダイポールアンテナを接続して使用した。表 2 に、BP35C5 の仕様を示す。

表2 無線モジュールBP35C5の仕様¹⁾

項目	内容
無線規格	ARIB STD-T108, FCC Part 15C 準拠
無線周波数	920 MHz 帯
変調方式	2値 GFSK
データレート	ARIB STD-T108 : 50 kbps, 100 kbps, 150 kbps, 300 kbps FCC Part 15C : 50 kbps, 150 kbps, 300 kbps
伝送電力	20 mW, 10 mW, 1 mW
受信感度	-105 dBm (TYP.) (50 kbps, BER<0.1%) -98 dBm (TYP.) (150 kbps, BER<0.1%)
周波数偏差	±20 ppm 以下
消費電流 (VDD=3.3V, データレート50kbps)	40 mA (TYP.) [送信 20 mW 出力] 20 mA (TYP.) [受信]
HOSTインターフェース	UART (115,200 bps), GPIO

3. 実験

3. 1. 障害物の無い環境における電波伝搬特性評価

測定環境を図1に示す。障害物の無いアスファルトの路面に送信機と受信機を設置し、送信機からデータ送信した際の、受信機の受信信号強度 (Received Signal Strength Indicator, RSSI [dBm]) を測定した。

送受信アンテナ間の距離は、50[m] 間隔で最大400[m]まで測定した。なお、電波伝搬においては、アンテナ間距離が半波長程度移動すると電波環境が大きく異なるため、測定点の±10[cm]、±20[cm]の地点で同様の測定を行った。

送受信アンテナは、地面からの高さを同一にしたうえで、フレネルゾーンを確保した見通し環境下の6.0[m]と、人間が設置するうえで現実的な高さである1.8[m]の2パターンで測定した。

無線モジュールのデータレート設定は 150[kbps]、送信データとしてペイロード4[byte] (32[bit])のUDPパケットを1[s]間隔で送信した。データ長4[byte]は、整数型 (int) や浮動小数点型 (float) を扱う上では十分なデータ幅であり、工場の温湿度管理に利用する



図1 受信信号強度の測定環境

温度・湿度データ等の、数値データの送受信を想定している。

RSSI [dBm]は受信機の無線モジュールから USB シリアル通信により取得した。

3. 2. 受信信号強度に対する通信特性評価

電波到達性が低下した際の通信特性を評価するため、RSSI に対するパケットエラーレート (PER [%]) を測定した。

3. 1. と同様、送信データとしてUDPパケット (ペイロード4[byte]) を1[s]間隔で送信し、RSSI [dBm]を受信機の無線モジュールからUSBシリアル通信により取得した。PER [%]は、UDPパケットの到達率で算出し、無線モジュールのデータレート設定は 50[kbps]、100[kbps]、150[kbps]、300[kbps]のそれぞれの条件で測定した。

4. 結果・考察

4. 1. 障害物の無い環境における電波伝搬特性評価

送受信アンテナ間の距離 d [m] に対する RSSI [dBm] を図2に示す。アンテナ高さ6.0[m]の場合、 $d \approx 400$ [m]においてRSSIは最大-74.74 [dBm]となり、パケットロスなく安定した通信ができた。一方、アンテナ高さ1.8[m]の場合、 $d \approx 200$ [m]においてRSSIが最大-77.54 [dBm]となり、パケットロスが発生した。

アンテナ高さ6.0[m]に比べ、アンテナ高さ1.8[m]のRSSIが低くなる理由は、フレネルゾーン内の大地の割合が大きくなり、見通し外 (Non Line of Sight, NLOS) となるためである。

自由空間における電波伝搬利得 G は、フリスの伝達公式³⁾より、送信電力 P_t と受信電力 P_r の比として、

$$G = \frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 G_t G_r \quad (1)$$

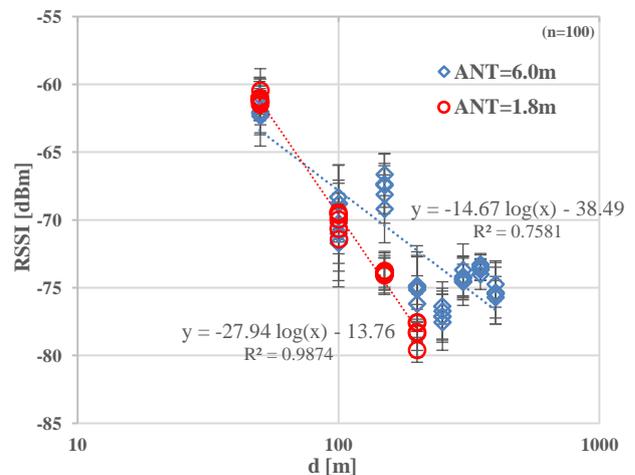


図2 障害物の無い環境における電波伝搬特性

で表される。ただし、 λ [m]は波長、 d [m]は送受信アンテナ間距離、 G_t は送信アンテナ利得、 G_r は受信アンテナ利得である。ここで、 $G_f = (\lambda/4\pi d)^2$ を自由空間伝搬利得といい、自由空間伝搬損失 L_f は、

$$L_f = \frac{1}{G_f} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad (2)$$

と表される。 L_f の単位を dB に変換すると、

$$\begin{aligned} L_f[\text{dBm}] &= 10 \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \\ &= 20 \log(d) + 20 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

となり、 L_f は $\log(d)$ の関数で表される。本実験では、大地や大気の大気吸収等による電波伝搬損失を表す減衰係数を l_1, l_2 とした伝搬損失 L_e として、以下の式で近似する。

$$\begin{aligned} L_e[\text{dBm}] &= l_1 \cdot 20 \log(d) + l_2 \cdot 20 \log\left(\frac{4\pi}{\lambda}\right) \\ &= \alpha \log(d) + \beta \end{aligned} \quad (4)$$

図2の結果から最小二乗法近似により、それぞれのアンテナ高さにおける電波伝搬の距離減衰特性が得られる。

アンテナ高さ 6.0[m] :

$$L_e = -14.67 \log(d) - 38.49 \quad (5)$$

アンテナ高さ 1.8[m] :

$$L_e = -27.94 \log(d) - 13.76 \quad (6)$$

これにより、障害物の無い環境において、送受信アンテナ間距離に対する RSSI を推定することが可能となり、無線機の設置場所を検討するための指針が得られた。

4. 2. 受信信号強度に対する通信特性評価

受信機の RSSI [dBm] に対する PER [%] を図3に示す。データレート設定 50 [kbps] では、-88 [dBm] 以下でパケットロスが発生し、-95 [dBm] でデータ伝送不可となった。データレート設定 100 [kbps] では、-80 [dBm] 以下でパケットロスが発生し、-89 [dBm] でデータ伝送不可となった。データレート設定 150 [kbps] では、-76 [dBm] 以下でパケットロスが発生し、-90 [dBm] でデータ伝送不可となった。データレート設定 300 [kbps] では、-73 [dBm] 以下でパケットロスが発生し、-80 [dBm] でデータ伝送不可となった。

低いデータレート設定で通信した場合、RSSI 低下の影響を受けにくいことが分かった。これは、本実験で使用した無線モジュール BP35C5 のチャンネル設定に由来すると考えられる。表3に、BP35C5 のチャンネル設定を示す。表2から、本モジュールは2値 GFSK 変調方式である。表3から、変調指数 (Modulation Index) は

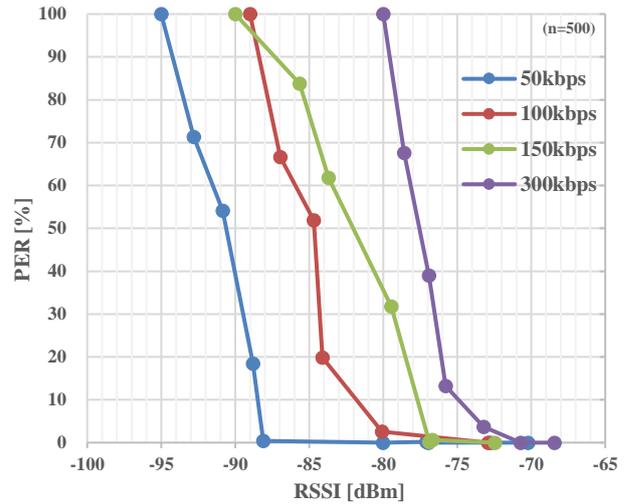


図3 受信信号強度に対する通信特性評価

50kbps と 100kbps において 1、150kbps と 300kbps において 0.5 であり、変調指数が小さいほど復調特性が悪化する。そのため、RSSI が低下した際、高いデータレート設定において通信特性が顕著に悪化したと考える。

図3の結果から、データレート設定 50 [kbps] の場合、RSSI が -88 [dBm] 以上であれば、パケットロスなく安定した通信が可能であることが分かった。この結果と 4. 1. の (3) (4) 式より、データレート設定 50 [kbps]、データ長 4 [byte]、データ送信間隔 1 [s] の場合の、それぞれのアンテナ高さにおける安定通信可能なアンテナ間距離は以下となる。

アンテナ高さ 6.0 [m] : 約 2,373 [m]

アンテナ高さ 1.8 [m] : 約 454 [m]

5. 結言

製造現場における LPWA 無線の通信特性を明らかにするため、Wi-SUN FAN の通信性能評価として、障害物の無い理想的な環境下における電波伝搬特性と、受信信号強度に対する通信特性評価を行った。

表3 BP35C5 のチャンネル設定¹⁾

Data Rate	50 kbps	100 kbps	150 kbps	300 kbps
n unit radio channel	1	2	2	3
Modulation Index	1	1	0.5	0.5
Channel space	200kHz	200kHz	200kHz	200kHz
Frequency Deviation	25.0kHz	50.0kHz	37.5kHz	75.0kHz

障害物の無い環境における電波伝搬特性評価として、見通し環境（アンテナ高さ 6.0[m]）と見通し外（アンテナ高さ 1.8[m]）における、送受信アンテナ間距離 d [m] に対する RSSI [dBm] を測定した結果、 $d \approx 400$ [m] において RSSI は最大 -74.74 [dBm] となり、パケットロスなく安定した通信ができた一方、アンテナ高さ 1.8[m] の場合、 $d \approx 200$ [m] において RSSI が最大 -77.54 [dBm] となり、パケットロスが発生した。また、 L_f [dBm] = $\alpha \log(d[m]) + \beta$ の関数で最小二乗近似することで、それぞれの条件下における電波伝搬の距離減衰特性を明らかにし、障害物の無い環境における無線機の設置場所検討のための指針が得られた。

さらに、電波到達性が低下した際の通信特性を評価するため、RSSI に対するパケットエラーレート（PER [%]）を測定した。結果、低いデータレート設定で通信した場合、RSSI 低下の影響を受けにくいことが分かった。また、データレート 50 [kbps] の場合、RSSI が -88 [dBm] 以上であれば、パケットロスなく安定した通信が可能であること、及びデータレート設定 50 [kbps]、データ長 4 [byte]、データ送信間隔 1 [s] の場合の安定通信可能距離は、アンテナ高さ 6.0 [m] において約 2,373 [m]、アンテナ高さ 1.8 [m] において約 455 [m] となった。

今後は、障害物のある環境下における Wi-SUN FAN の通信性能を評価するとともに、Wi-Fi HaLow（IEEE 802.11ah）、LoRa（LoRaWAN, PrivateLoRa）等、他の LPWA 通信規格の通信性能を評価し、各々の特性を把握する。さらに、LPWA を用いた無線通信 IoT システムを構築し、実際の製造現場へ導入することで、実現場におけるシステム安定性や耐障害性を評価する。

参考文献

- 1) “BP35C5 : Wi-SUN Module”, ROHM Co., Ltd., https://fscdn.rohm.com/jp/products/databook/datasheet/module/power_module/specified_low_power/bp35c5-j.pdf, (参照 2023-2-23).
- 2) “Wi-SUN 搭載 USB 基板”, (株) 日新システムズ, https://www.co-nss.co.jp/products/download/catalog/catalog-wisunfan_usbboard.pdf, (参照 2023-2-23).
- 3) HARALD T. FRIIS, “A Note on a Simple Transmission Formula”, Proceedings of the IRE, Volume:34 Issue:5, p. 254-256.