

## 施設園芸環境での 2.4GHz 帯と 429MHz 帯無線通信特性の分析

李 鵬昆<sup>†</sup> 井林 宏文<sup>†</sup> 峰野 博史<sup>†</sup>

静岡大学大学院情報学研究科

## 1 はじめに

無線技術やセンサ技術の発展により、無線センサネットワークを用いて様々な環境データを収集可能となりつつある。これまで、2.4GHz 帯無線センサネットワークを用いて施設園芸環境制御システムを研究開発してきたが、高温多湿かつ金属パイプや成長した農作物といった様々な障害物の存在する施設園芸環境では、無線通信品質が不安定となり 99.99%以上の稼働率を実現することが困難だった。

本研究では、施設園芸環境のような過酷な環境で受信信号強度 (RSSI: Received Signal Strength Indicator) を低下させる要因について検討する。特に、2.4GHz 帯に比べ波長が長く回折性に優れる 429MHz 帯無線通信との比較を電波暗室にて実施した実験結果を報告する。

## 2 関連研究

無線電波伝搬は、距離、大地の電気特性やフレネルゾーン、大気中の酸素や水分等による減衰や反射の影響を受ける[1]。ISM (Industrial, Scientific and Medical) バンドで広く利用されてきた 2.4GHz 帯無線通信は、果樹園のような屋外環境であれば、アンテナ高さや距離を調整しやすく、効果的な位置に設置することで RSSI 減衰や変動を抑えられる[2]。しかし、金属パイプや植物等の障害物が多数存在する施設園芸環境では、RSSI 減衰や変動が激しく、安定した無線通信品質を得ることが困難だった[3]。

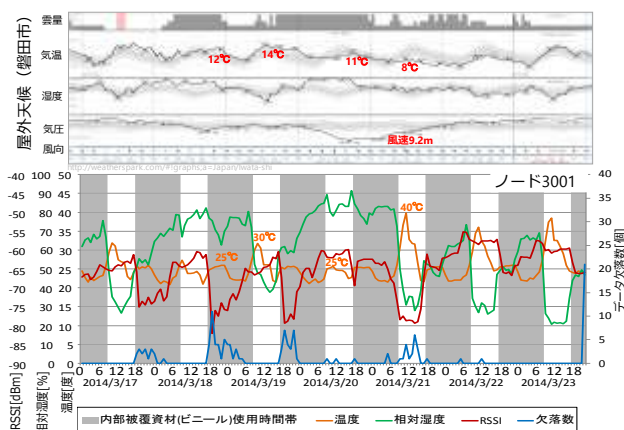


図 1: 各種環境データと RSSI, データ欠落数の推移

## 3 電波減衰要因の検討

図 1 に現場施設園芸環境の環境データとシンクノードでの RSSI やデータ欠落数を示す。詳細に分析したところ、施設園芸環境内部で小部屋を作るのに使用した被覆資材フィルムや、小部屋内外温湿度差によって被覆資材表面に生じる結露、生育によって無線通信見通し距離内に繁茂する植物体、空調制御や強風時に天窓開口時に入り込む風によって無線センサノード自体 (指向性アンテナ含む) が揺れること、が電波減衰に影響を与えているのではと考えた。

## 3.1 水分の影響

2.4GHz 帯無線通信における水の比誘電率は約 80 であり [3], 2.4GHz 帯無線電波の吸収率が高いことを示している。施設園芸環境内の植物体は、水分含有率が約 70% 以上あるため、植物体に含まれる水分に電波が吸収され、電波減衰によってパケットロスが生じた可能性がある。

また、施設園芸環境内に小部屋を作って異なる温湿度制御での生育調査を実施していたため、小部屋内外温湿度差によって被覆資材表面に結露が生じ、結露による電波反射や屈折、吸収によって RSSI が低下し、パケットロスが生じた可能性も考えられる。

## 3.2 アンテナ揺れの影響

図 1 で RSSI 減衰しパケットロスの生じた期間は、空調制御による送風発生時や、2014/3/21 昼間の風速 9.2m と強い風 (春の嵐) であった。本実験で設置した温湿度センサノードは、温湿度の計測を植物体の周辺で実施するため、紐で吊り下げる形で設置しており、空調稼働時の強い送風で植物体や温湿度センサノード自体が揺れ動いていた可能性がある。また、温室天窓は通常昼間排熱のために解放されるため、屋外の強風が温室内にも流れ込み、植物体や温湿度センサノード自体が揺れ動く可能性もあった。

シンクノードで受信される電波は、センサノードからの直接波と他の物体で反射する間接波との合成波であり、合成波の信号強度は直接波と間接波の位相差で決定される。位相差が 0 の場合、合成波の信号強度は直接波の 2 倍となるが、位相差が 1/2 波長の場合は合成波の信号強度が 0 になってしまう。そのため、波長約 12.5cm の 2.4GHz 帯無線通信では、位相差が 1/2 波長である 6.25cm の変動で信号強度は 0~2 倍と大きく変動すると考える。一方、429MHz 帯無線通信の波長は約 69.9cm であるため、アンテナが数 cm 揺れても影響を受け難いと考える。

## Analysis of 2.4GHz band and 429MHz band wireless communication characteristics in greenhouse environment

Pengkun Li<sup>†</sup>, Hirofumi Ibayashi<sup>†</sup>, Hiroshi Mineno<sup>†</sup><sup>†</sup> Graduate school of Informatics, Shizuoka University

表 1: 使用無線モジュールの仕様

使用周波数帯, 搭載 MAC プロトコル	無線モジュールチップ	送信電力 (mW)	アンテナ 方向性
1) 2.4GHz IEEE 802.15.4-2006 方式	CC2420	10	指向性
2) 2.4GHz IEEE 802.15.4e TSCH	LTC5800	6.3	指向性
3) 429MHz IEEE 802.15.6 方式	CC1120 (A400)	10	全方向性
4) 429MHz IEEE 802.15.6 方式	CC430 (N400)	10	指向性

## 4 電波暗室での検証実験

### 4.1 実験条件

前述の水分やアンテナ揺れの影響を分析するために、電波暗室（長辺 9.6m×短辺 3m×高 3m）にて検証実験を行った。第一フレネルゾーンの影響や大地の誘導電流の影響を考慮し、無線モジュールを地上から 1.5m に設置した。また、施設園芸環境の小部屋サイズと電波暗室サイズの制約を考慮し、ノード間距離を 5m とした。

表 1 に使用無線モジュールを示す。各無線モジュールや全実験時間制約上、2.4GHz IEEE802.15.4-2006 方式と 2.4GHz IEEE802.15.4e TSCH (Time Slotted Channel Hopping) センサノードは 2 秒毎送信で計 450 パケット、429MHz IEEE 802.15.6 方式の両センサノードは 6 秒毎送信で計 150 パケットで実施した。また、ペイロードサイズはどれも約 16bytes になるよう調整した。

### 4.2 障害物の影響実験

被覆資材や水分といった障害物の影響を調査するために、ノードを何も覆わない場合（障害物なし）被覆資材と同一素材のフィルムで各ノードを覆った場合（フィルムあり）、ノードを覆ったフィルム表面に霧吹きで水滴を付けた場合（フィルム（水滴付））、植物体を模して湿らせたタオルでノードを覆った場合（濡れタオル）、で実施した。

図 2 に各ノードの RSSI と PER (Packet Error Rate) を示す。2.4GHz 帯ノードの場合、フィルム有無や濡れタオルで RSSI は約 3dB、PER は約 0.07% 変化した。一方、429MHz 帯ノードの場合、フィルム有無や濡れタオルで RSSI は 5~17dB 低下したが、PER は全て 0% であった。この結果から、429MHz ノードの濡れタオルは単なる障害物となっただけで、水分が、2.4GHz 帯や 429MHz 帯無線通信に与える影響はあまり大きくないと考えられる。

### 4.3 アンテナ揺れの影響実験

アンテナ揺れの影響を分析するために、送信アンテナを地面と垂直に設置する場合（垂直）と、センサノードを竹籠でぶら下げ、扇風機と木の棒を用いて実験中揺らし続ける実験（回転）を実施した。

図 3 に各ノードの RSSI と PER を示す。2.4GHz 帯ノード場合、アンテナ揺れによって RSSI は約 20dB 低下し PER は約 2.16% 増加した。一方、429MHz 帯ノードの場合、

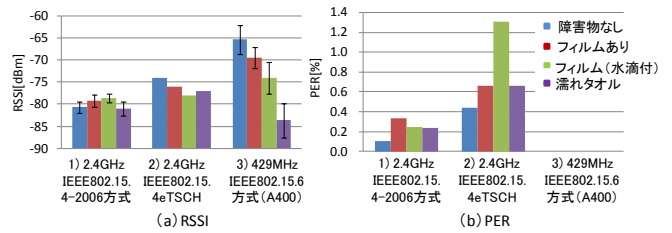


図 2: 障害物の影響実験結果

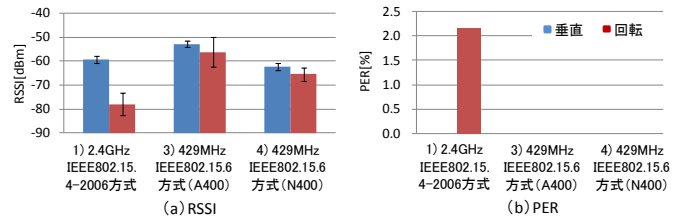


図 3: アンテナ揺れの影響実験結果

合、アンテナが揺れても RSSI は約 3dB 程しか低下せず PER も 0% のままだった。2.4GHz 帯と比べ 429MHz 帯は波長が長く、アンテナが数 cm 揺れても合成波の信号強度に大きな影響を与えなかったからと考える。

以上の分析結果から、現場施設園芸環境で空調制御時間帯や屋外強風時に PER が上昇したのは、風によってアンテナが揺れ、RSSI が大きく変動し、その結果無線モジュールでの受信感度を下回ったことが主要因だったと考える。

## 5 おわりに

本研究では、施設園芸環境のような過酷な環境で RSSI を低下させる要因について検討し、被覆資材や水分といった障害物に加え、アンテナ揺れの影響を想定し電波暗室で実験を行った。その結果、被覆資材や水分といった障害物は 2.4GHz 帯や 429MHz 帯無線通信に与える影響はあまり大きくなく、波長に対するアンテナ揺れの影響が大きいたことが確認できた。無線ノードやアンテナの固定、予期せぬ数 cm 程度の揺れに対しては、使用周波数を下げることで RSSI 減衰や変動を抑えられると考える。

今後、現場環境で生じる予期せぬ電波干渉を自律的に検知し、使用チャンネルを動的に変更して電波干渉を回避する仕組みを検討し、高信頼な無線制御システムの実現を目指していく。

## 参考文献

- [1] 細矢良雄: 電波伝搬ハンドブック, リアライズ社(1999).
- [2] Wei Zhang, et al.: Research on WSN Channel Fading Model and Experimental Analysis in Orchard Environment, CCTA 2011, pp.326-333 (2012).
- [3] 井林宏文, 他: 高信頼双方向多点無線センサ/アクチュエータネットワークシステムの評価, DICOM02014 (2014).
- [4] Arthur R. von Hippel, et al.: Dielectrics and Waves, Artech House Microwave Library (1995).