

THE IEICE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS (JAPANESE EDITION)

IEICE 電子情報通信学会
B 論文誌

通 信

VOL. J108-B NO. 7

JULY 2025

本PDFの扱いは、電子情報通信学会著作権規定に従うこと。
なお、本PDFは研究教育目的（非営利）に限り、著者が第三者に直接配布することができる。著者以外からの配布は禁じられている。

通信ソサイエティ

一般社団法人 電子情報通信学会

THE COMMUNICATIONS SOCIETY

THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

LoRa 伝送実現のための RTK 補正情報削減と伝送遅延が RTK 測位の成否に与える影響の調査

鈴木 一哉^{†a)} (正員) 熊谷紗耶加[†]

Investigating Impact of RTK Correction Data Reduction and Delay on High Accuracy Positioning for LoRa Transmission

Kazuya SUZUKI^{†a)}, Member and Sayaka KUMAGAI[†], Nonmember

[†] 秋田県立大学システム科学技術学部, 由利本荘市

Faculty of Systems Science and Technology, Akita Prefectural University, Yurihonjo-shi, 015-0055 Japan

a) E-mail: kazuya-suzuki@akita-pu.ac.jp

DOI:10.14923/transcomj.2024BLL0001

あらまし RTK (Real Time Kinematic) GNSS 測位方式は、移動局が基準局から受け取った RTK 補正情報を用いることで精度の高い測位を実現する。RTK 補正情報の転送に LPWA の一種である LoRa を使うことにより、RTK 測位の利用場面の拡大が期待できる。しかし、LoRa の通信速度は低いため、送信すべき補正情報の量を削減する必要がある。また、通信速度が低いということは、削減した RTK 補正情報の転送にも時間がかかることを意味する。そこで、我々は、RTK 補正情報の削減量や伝送遅延が RTK 測位の成否に与える影響を調査した。

キーワード RTK GNSS 測位, LPWA, LoRa

1. まえがき

RTK (Real Time Kinematic) GNSS 測位方式 [1] とは、正確な座標がわかっている基準局から受け取った RTK 補正情報を用いることによって、移動局が誤差数センチメートルという高精度な測位を実現する方式である。この RTK 補正情報の送信に LPWA の一種である LoRa を使うことで、RTK 測位の利用場面の拡大が期待できる。

基準局から移動局へと送られる RTK 補正情報の量は 1 秒あたり約 800 バイトであり、それらを伝送するのに約 6.4 kbps の通信速度が必要となる。一方で、パラメータによって決まる LoRa の通信速度は、最大 22 kbps である [2]。しかし、日本の電波法に基づき定められた標準規格である ARIB STD-T108 [3] において、1 時間あたりの送信可能時間を 360 秒までに制限しているため、実際に伝送可能なデータ量は一秒あたり 2200 ビットとなる。そのため RTK 補正情報の送信に LoRa を使う場合、送信する RTK 補正情報の量を減らす必要がある。しかし、RTK 補正情報を減らしすぎると、RTK 測位ができなくなる可能性がある。そこ

で、我々は、RTK 補正情報の削減量と RTK 測位の可否について調べた (評価 1)。

また、LoRa の通信速度は低いため、例えば RTK 補正情報を構成するあるメッセージを LoRa を使って送信する場合、送信開始から受信完了までに時間がかかる。そのため、移動局は、生成されてからある程度時間が経過した RTK 補正情報を用いて RTK 演算を行うこととなる。このように生成されてから時間の経過した RTK 補正情報を用いた場合、RTK 演算が可能であるかの評価を行った (評価 2)。

LoRa を用いて RTK 補正情報を送るシステムに関しては既に報告が存在する [4]。しかし、この報告では、どの程度の量の RTK 補正情報を LoRa で送っているのか明らかにしていない。LoRa の通信速度と通信距離は、トレード・オフの関係にあり、主に拡散率と帯域幅の二つのパラメータの値によって依存する [5]。本研究が RTK 測位が可能な範囲の RTK 補正情報の削減量が明らかにすれば、必要な通信速度を確保するためのパラメータの値が定まる。そのパラメータによって通信距離がどの程度になるかに関しては、通信環境に影響されるが、これまで数多くの調査結果が報告されている [6]~[9]。我々の研究はこれらの報告と組み合わせることで、LoRa を用いた RTK 測位システムがどのような場面で使えるか否かの判断に貢献する。

2. RTK 測位

RTK 測位とは、正確な座標がわかっている基準局が生成した補正情報を用いて位置測位を行う差分測位の一種で、誤差数センチメートルの精度での測位が可能な方式である。RTK 測位方式を用いた測位手順は次のとおりである。

- (1) 正確な位置がわかっている基準局を用意する。
- (2) 基準局は自身が受信した GNSS 情報の観測値から補正データを生成し、移動局へと送る。
- (3) 移動局は、受け取った RTK 補正情報と自身の観測データを用いて RTK 演算を行い、自身の位置を算出する。

このような手順で、最終的には Fix 解と呼ばれる誤差数センチメートルの測位結果が得られる。この Fix 解を求める過程において、誤差数メートルの精度の測位結果が得られる。この測位結果を Float 解と呼ぶ。

基準局から移動局に RTK 補正情報を送る際のメッセージフォーマットは RTCM3 と呼ばれ、文献 [10] にて定められている。この文献には数多くの種別のメッセージが定義されているが、高精度測位では 1005 (Station-

ary RTK Reference Station ARP), 1077 (GPS MSM7), 1087 (GLONASS MSM7), 1097 (Galileo MSM7), 1127 (BeiDou MSM7), 1230 (GLONASS L1 and L2 Code-Phase Biases) の六つのメッセージが広く用いられている [11]. 基準局は通常 1 秒ごとにこれらの六つのメッセージを生成する. 1005, 1230 のメッセージサイズは, それぞれ 19 バイト, 8 バイトである. 1077, 1087, 1097, 1127 のメッセージサイズは, 観測される衛星数によって変わる. 今回の実験時の衛星数は 28 であり, このときこれらの四つのメッセージのサイズは合計で 780 バイトである. これらの値を合計すると 807 バイトとなり, これが実験時に基準局が 1 秒ごとに生成する RTK 補正情報の量である.

インターネットを介した RTK 補正情報のやり取りには, NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) [12] と呼ばれる TCP 上のプロトコルが広く用いられている. NTRIP においては, NTRIP Server と呼ばれる RTK 補正情報を生成する基準局が, 補正情報を NTRIP Caster へと送る. NTRIP Caster は, NTRIP Client と呼ばれる RTK 補正情報を利用する移動局へと RTK 補正情報を転送する.

3. 想定システム

ここでは, 我々が想定する LoRa を用いた RTK 補正情報送信システムについて説明する. 我々は将来スマート農業において, 本システムを農機自動運転に適用することを考えている. 図 1 に示す二つのシステム構成が考えられる. 図 1 における Rover が, 移動局 (例えば自動運転の農機など) に相当する.

図 1 (A) は, 農場に設置した基準局 (Reference station) が直接 LoRa を使い, 移動局 (Rover) に送ることを想定したシステム構成である. 基準局は, RTK 補正情報を LoRa で送るために, RTK 補正情報の生成周期を現在の 1 秒からより長い値へ変更するか, 若しくは生成した RTK 補正情報を LoRa で送信可能な量に削減する.

RTK 補正情報を生成する基準局としての機能と, そ

れらを LoRa を用いて送信する機能を分離したほうが, 活用範囲が広がると考えられる. 図 1 (B) の構成では, 基準局は, RTK 補正情報を NTRIP Caster 経由でゲートウェイに送る. ゲートウェイが受け取った RTK 補正情報を間引いたうえで, LoRa を用いて転送する. このようにすることで, 基準局及びゲートウェイをそれぞれ条件にあった場所に設置することが可能となる. また, この構成であれば, 自前で基準局を設置しなくても, 商用サービスとして提供されている基準局を利用することもできる.

4. 評価

4.1 評価方法

我々は次の二つの評価を実施した. 評価 1 では, RTK 補正情報の削減量と, RTK 測位の成否の関係について調べた. また, 評価 2 では, RTK 補正情報の送信遅延が RTK 測位に与える影響を調べた.

本評価では, 図 2 に示すシステムを用いた. 移動局 (Rover) はシングルボードコンピュータである Raspberry Pi と GNSS モジュールにて構成した. GNSS モジュールには, RTK 演算エンジンが搭載されている ublox 社製の ZED-F9P [13] を使用した. 移動局は, モバイルルータ経由でインターネット接続した.

今回の評価に必要なソフトウェアを試作し, シングルボードコンピュータ上にて動作させた. そのソフトウェアは NTRIP Caster に TCP で接続し, NTRIP を用いて RTK 補正情報を取得する. そして, 取得した RTK 補正情報に対し, 削減若しくは遅延挿入の処理を行い, GNSS モジュールへと送る.

RTK 補正情報を受け取った GNSS モジュールは, 1 秒ごとに RTK 演算を行い, NMEA 形式の測位結果をシングルボードコンピュータに送る. この測位結果には, 測位精度を示す品質情報が含まれている. この品質情報は, 測位精度が低い順に単独測位, 差分測位, RTK 測位 (Float 解), RTK 測位 (Fix 解) のいずれかと

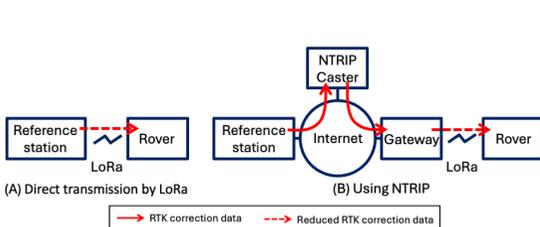


図 1 想定システム構成
Fig. 1 Assumed system configuration.

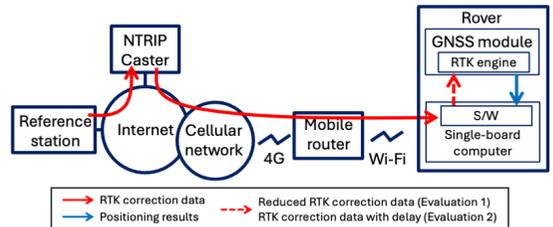


図 2 評価システム
Fig. 2 Evaluation system.

なる。本評価においては、この品質情報を用いて、Fix 解が得られたか否かを確認した。

本評価では、図 2 中の移動局とモバイルルータを動作させた状態で自動車に乗せ、秋田県立大学本荘キャンパスの敷地内約 500 m の区間を 20 km/h で走らせた。移動開始から終了までの間、連続して Fix 解が得られるかを確認した。

4.2 RTK 補正情報の削減が RTK 測位の成否に与える影響の評価 (評価 1)

RTK 補正情報を削減した場合、RTK 測位の成否に与える影響を評価した。本評価において、図 2 中のソフトウェアは、NTRIP 経由で 1 秒周期で送られてくるメッセージ群を p 秒に 1 回のみ GNSS モジュールに送ることとし、残りは破棄することとした。

評価 1 の結果を表 1 に示す。表 1 を見ると、送信周期を 30 にした場合でも、移動中得られる測位結果は全て Fix 解であった。

4.3 RTK 補正情報の伝送遅延が RTK 測位の成否に与える影響の評価 (評価 2)

RTK 補正情報の伝送遅延が RTK 測位の成否に与える影響を評価した。本評価において、図 2 中のソフトウェアは、NTRIP 経由で受信した RTK 補正情報をいったんバッファにとどめ、受信から d 秒後に GNSS モジュールに送ることとした。評価 2 では、評価 1 で行っていた RTK 補正情報の削減は行わず、NTRIP 経由で受信した RTK 補正情報を全て GNSS モジュールに送ることとした。

表 1 評価 1 の結果

p (second)	3	5	10	30
Fix solution	✓	✓	✓	✓

表 2 評価 2 の結果

d (second)	35	36	37	38	40
Fix solution	✓	✓	✓	×	×

表 3 LoRa の通信速度及び必要速度 (68560 bps) に対する割合
Table 3 LoRa transmission rate and ratio to the required 68560 bps rate.

		Spreading factor					
		7	8	9	10	11	12
Frequency bandwidth	125 kHz	5469 bps (7.98%)	3125 bps (4.56%)	1758 bps (2.56%)	977 bps (1.42%)	537 bps (0.78%)	293 bps (0.43%)
	250 kHz	10938 bps (15.95%)	6250 bps (9.12%)	3516 bps (5.13%)	1953 bps (2.85%)	1074 bps (1.57%)	586 bps (0.85%)
	500 kHz	21875 bps (31.91%)	12500 bps (18.23%)	7031 bps (10.26%)	3906 bps (5.70%)	2148 bps (3.13%)	1172 bps (1.71%)

評価 2 の結果を、表 2 に示す。遅延時間が 37 秒以下であれば、移動中の測位結果は全て Fix 解であった。しかし、遅延時間が 37 秒より大きくなると、Float 解や単独測位の結果が出力される場合があった。

5. 考察

前章の評価結果を用いて、LoRa で伝送する際の RTK 補正情報の削減量について考察する。

2. にて述べたとおり RTK 補正情報の量は観測される衛星数によって変わる。GNSS 衛星は約 24 時間周期で航行しており、時間によって観測される衛星数は異なる可能性がある [11]。そのため、同時に観測できる衛星数を 24 時間にわたって調べたところ、最小で 27、最大で 30 であった。観測される衛星数が 30 である場合、RTK 補正情報の量は 1 秒間に 857 バイト (6856 ビット) になる。

ARIB STD-T108 には単位時間あたりの送信可能時間が 1/10 以下にするという制限があるため、毎秒 857 バイトを送るのに、68560 bps の通信速度が必要になる。この通信速度を、ここでは必要速度 (required rate) と呼ぶこととする。一方、LoRa の通信速度は、主に周波数帯域幅 (Frequency bandwidth) と拡散率 (Spreading factor) の二つのパラメータによって決まる [5]。これら二つのパラメータと通信速度の関係を表 3 に示す。また、表 3 には、通信速度の必要速度である 68560 bps に対する割合を示す。

RTK 補正情報を 1/30 に削減した場合、その必要速度は 2186 bps になる。Table 3 を見ると、周波数帯域幅が 125 kHz で拡散率が 8 以下、周波数帯域幅が 250 kHz で拡散率が 9 以下、周波数帯域幅が 500 kHz で拡散率が 10 以下の場合、必要速度よりも通信速度の値が大きくなることがわかる。

次に、LoRa を使って RTK 補正情報を送るときの伝送遅延に関して考察する。仮に拡散率 10、周波数帯域幅 500 kHz の組み合わせを使用する場合、先の考察から 1 秒ごとに生成される RTK 補正情報を 30 回に 1 回

だけ送れば良い。1回で857バイト(6856ビット)のデータを3906bpsの通信速度で送ると、約2秒程度かかる。この値は、評価2の結果の最大37秒と比べると、小さな値なので、送信に関する遅延がRTK測位に与える影響は無視できると考えられる。

6. むすび

一般的な基地局が1秒間に生成するRTK補正情報の量は、LoRaの通信速度よりも大きい。そのためLoRaを使う場合、転送するRTK補正情報の量を減らす必要がある。本研究では、RTK補正情報の削減量が、RTK測位の可否に与える影響について調査した。その結果、RTK補正情報の量を1/30にまで削減したとしても、RTK測位が可能なが確認できた。また、通信速度が低いLoRaを使う場合、RTK補正情報を構成するメッセージが移動局に届くまでに時間がかかる。このRTK補正情報の転送にかかる遅延がRTK測位の可否に与える影響について調査した。その結果37秒以下の遅延であれば、RTK測位が可能であることがわかった。

文 献

- [1] R.B. Langley, "RTK GPS," *GPS World*, vol.9, no.9, pp.70-76, Sept. 1998.
- [2] Semtech Corporation, "SX1272/73 Datasheet," https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/E0000000JelG/a/440000001NCE/v_VBhk1IolDgxwwnOpcS_vTFxPfSEPQbuneK3mWsXIU, accessed April 16, 2024.
- [3] 920 MHz 帯テレメータ用テレコントロール用及びデータ伝送用無線設備, 電波産業会, ARIB STD-T108 1.5 版, 2023.
- [4] P. Mayer, M. Magno, A. Berger, and L. Benini, "RTK-LoRa: High-precision, long-range, and energy-efficient localization for mobile IoT devices," *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, vol.70, 2021. 10.1109/TIM.2020.3042296
- [5] Semtech Corporation, "LoRa modulation basics," <https://semtech.my.salesforce.com/sfc/p/#E0000000JelG/a/2R0000001OJa/2BF2MTeiqIwkmxkcjDZzalPUGIJ76Ldqiv.30prH8>, accessed Sept. 17, 2024.
- [6] J. Petajarjarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen, and M. Pettissalo, "On the coverage of LPWANs: Range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology," *Proc. 14th Conf. ITS Telecommunications*, Jan. 2016. 10.1109/ITST.2015.7377400
- [7] M.R. Seye, B. Ngom, B. Gueye, and M. Diallo, "A study of LoRa coverage: Range evaluation and channel attenuation model," *Proc. 1st Conf. Smart Cities and Communities, Ouagadougou*, Dec. 2018. 10.1109/SCCIC.2018.8584548
- [8] M.J. Faber, K.M. van der Zwaag, W.G.V. dos Santos, H.R.O. Rocha, M.E.V. Segatto, and J.A.L. Silva, "A theoretical and experimental evaluation on the performance of LoRa technology," *IEEE Sensors J.*, vol.20, no.16, pp.9480-9489, April 2020. 10.1109/JSEN.2020.2987776
- [9] 鈴木一哉, 鷹島久光, 佐藤貞志, "LoRa を用いた介護施設送迎バス位置管理システムの開発と実証," *情報処理学会論文誌トランザクションデジタルプラクティス*, vol.2, no.3, pp.47-57, 2021.
- [10] "Differential GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Services - Version 3," *Radio Technical Commission for Maritime Services, RTCM Standard 10403.3*, 2016.
- [11] 岡本 修, "センチメートル GPS 測位 F9P RTK キット・マニュアル: 自律ロボット・ドローンから IoT・広域計測まで," *トランジスタ技術 SPECIAL 編集部 (編), CQ 出版株式会社*, 東京, 2020.
- [12] "Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) - Version 2," *Radio Technical Commission for Maritime Services, RTCM Standard 10410.1*, 2011.
- [13] u-blox AG, "u-blox F9 high precision GNSS receiver Interface description," https://content.u-blox.com/sites/default/files/documents/u-blox-F9-HPG-L1L5-1.40_InterfaceDescription_UBX-23006991.pdf, accessed April 16, 2024.

(2024年9月19日受付, 12月11日再受付,
2025年1月23日早期公開)