

ОЦЕНКА И КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ СИНХРОНИЗАЦИИ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ ПРИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ УСТРОЙСТВ

Г.А. Фокин, д.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, grihafokin@gmail.com;

К.Е. Рютин, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, ryutin.sut@gmail.com.

УДК 621.396.969

Аннотация. Разностно-дальномерный метод позиционирования пользовательских устройств требует жесткой временной и частотной синхронизации источников навигационных сигналов. В данном исследовании описан лабораторный эксперимент по оценке и компенсации погрешности синхронизации базовых станций при позиционировании пользовательских устройств.

Ключевые слова: 4G; LTE; SDR; синхронизация; позиционирование.

ESTIMATION AND COMPENSATION OF BASE STATION SYNCHRONIZATION ERROR DURING POSITIONING OF USER DEVICES

Grigoriy Fokin, Doctor of Science, assistant professor, St. Petersburg State University of Telecommunications n/a prof. M.A. Bonch-Bruevich;

Konstantin Ryutin, St. Petersburg State University of Telecommunications n/a prof. M.A. Bonch-Bruevich.

Annotation. The range-difference method of positioning user equipment requires strict time and frequency synchronization of navigation signal sources. This study describes a laboratory experiment on estimation and compensation of base station synchronization error during positioning of user equipment.

Keywords: 4G; LTE; SDR; synchronization; positioning.

Введение

Актуальность задачи позиционирования пользовательских устройств (*UE – User Equipment*) в инфраструктуре сетей беспроводной связи [1-3] обусловлена проблемой стабильного приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в условиях плотной городской застройки и внутри помещений. Использование сигналов базовых станций стандартов *LTE (Long Term Evolution) eNodeB (eNB)* [4] и *5G NR (New Radio) gNodeB (gNB)* [5] может помочь преодолеть эту проблему и повысить точность определения местоположения *UE*.

Целью исследования, результаты которого отражены в статье, является разработка подсистемы синхронизации базовых станций (*eNB – eNodeB*) для задачи повышения точности определения местоположения (ОМП) пользовательских устройств (*UE – User Equipment*) в сети стандарта *LTE (Long-Term Evolution)*.

В стандартах *LTE* [6] и *5G* [7] специфицирован метод позиционирования по разности времен приема (*OTDOA – Observed Time Difference Of Arrival*) опорных сигналов позиционирования (*PRS – Positioning Reference Signal*) [8]. Предыдущие разработки технологии сетевого позиционирования на основе программно-определяемого радио (*SDR – Software-Defined Radio*) показали, что передача [9] и прием [10] опорных сигналов сот (*CRS – Cell-Specific Reference Signal*) позволяют достичь дециметровой точности определения местоположения *UE*. Однако, лабораторные [11] и полевые [12] испытания показали, что достигнутая точность

сильно зависит от идеальной временной и частотной синхронизации источников навигационных сигналов *eNB*. Если для задач связи восстановление *MIB* (*Master Information Block*) [13] требует синхронизации до одного субкадра длительностью 1 мс, то для задач навигации ошибка синхронизации, равная 1 нс, приводит к ошибке определения местоположения *UE*, равной 0,3 м. Проблема высокоточной временной синхронизации беспроводных устройств связи и навигации также была тщательно исследована в работах [14-20].

Материал данной статьи сформирован следующим образом: во втором разделе приводится описание идеальной подсистемы синхронизации, используемой при проведении полевых испытаний; в третьем – приводится описание подсистемы синхронизации, работающей по протоколу *PTP*; в четвертом – приводится описание метода компенсации погрешности синхронизации опорным приемником сигналов стандарта *LTE*; в последнем разделе приводится экспериментальная апробация описанного метода компенсации погрешности синхронизации в лабораторных условиях.

Описание идеальной подсистемы синхронизации

В ходе проведения полевых испытаний использовалась подсистема синхронизации *eNB*, состоящая из сервера точного времени «Метроном-*PTP-1U-V2*» [21] и транслятора [22] «Метроном-*T*» производства компании Метротек. При данном подходе выходы сигналов временной и частотной синхронизации 1 *PPS* и 10 МГц сервера точного времени подключаются коаксиальными кабелями [23] к соответствующим входам транслятора, а уже с него раздаются на четыре макета *eNB* [12]. То есть, *eNB* синхронизированы от одного источника. При анализе на осциллографе [24] двух каналов сигнала 1 *PPS* транслятора, фронты импульсов синхронизации отстоят друг от друга меньше, чем на 100 пс, что позволяет использовать данную подсистему синхронизации в качестве эталонной, с которой можно сравнивать все последующие решения в данном направлении работ. На рис. 1-3 приводятся схема, фотография и осциллограмма измерения относительного сдвига фронтов двух сигналов 1 *PPS* транслятора Метроном-*T*, соответственно. На рис. 3 цена деления шкалы времени равна 500 пс/дел (крупные клетки).

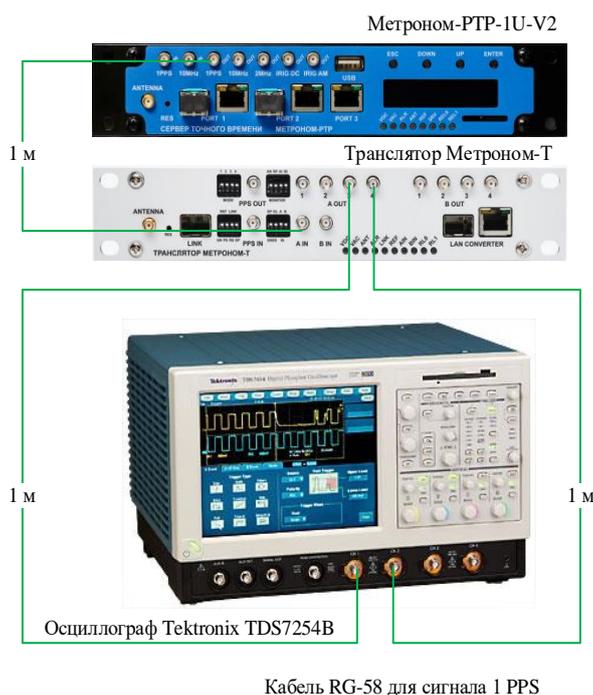


Рисунок 1

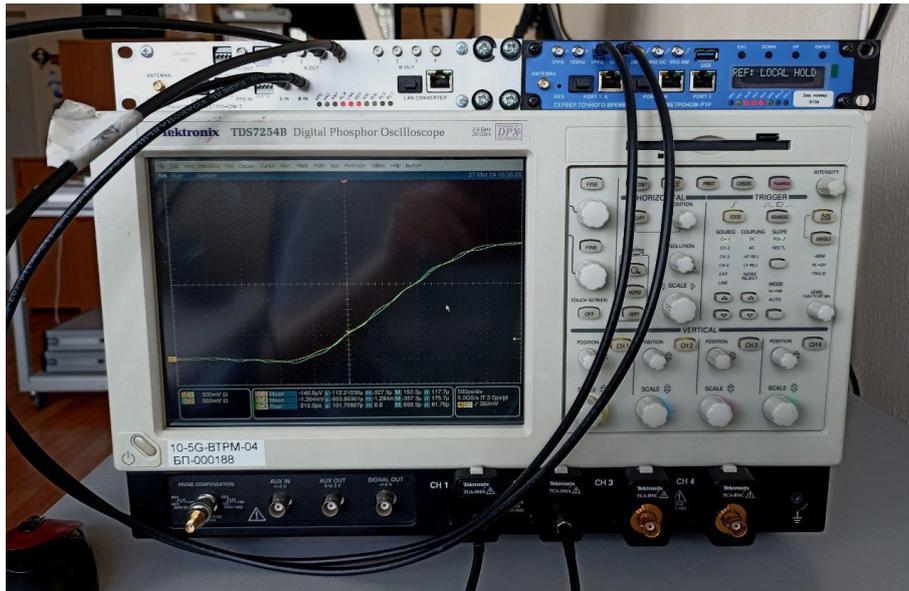


Рисунок 2

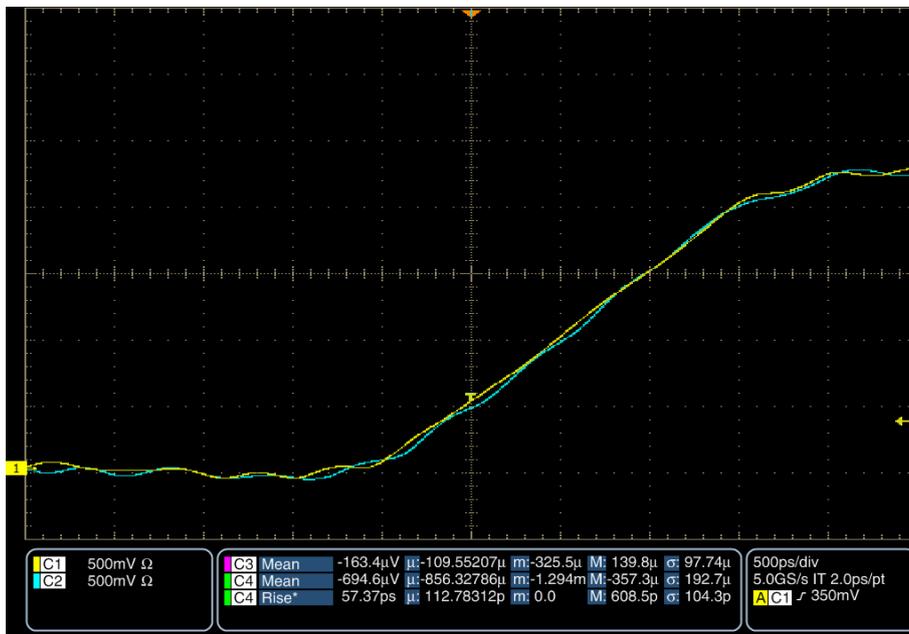


Рисунок 3

Для оценки влияния погрешности синхронизации на точность ОМП при использовании эталонной подсистемы синхронизации выходы сигналов 1 PPS и 10 МГц транслятора подключались к соответствующим входам двух макетов *eNB*, далее происходила синхронизация и запуск *eNB* на передачу сигнала стандарта *LTE*. Сигналы с двух макетов *eNB* объединялись в сумматоре [25], выход которого был подключен ко входу приемного канала макета *UE*. Для конфигурации и запуска макетов *eNB* и *UE* они были подключены в общую локальную сеть через сетевой коммутатор [26]. После приема сигнала стандарта *LTE* макетом *UE* выполнялась оценка разности расстояний между макетами *eNB* и данным местоположением макета *UE*. Эквивалентом расстояний между каждой *eNB* и *UE* в данном эксперименте являются коаксиальные кабели разной длины (5 и 2 метра), по которым сигнал *LTE* передается от *eNB* к *UE*. Следовательно, ожидаемая разность расстояний Δd , измеренная на стороне *UE*, равна $\Delta d = d_{eNB2} - d_{eNB1} =$

5 м – 2 м = 3 м. На рис. 4 изображена схема тестирования эталонной подсистемы синхронизации.

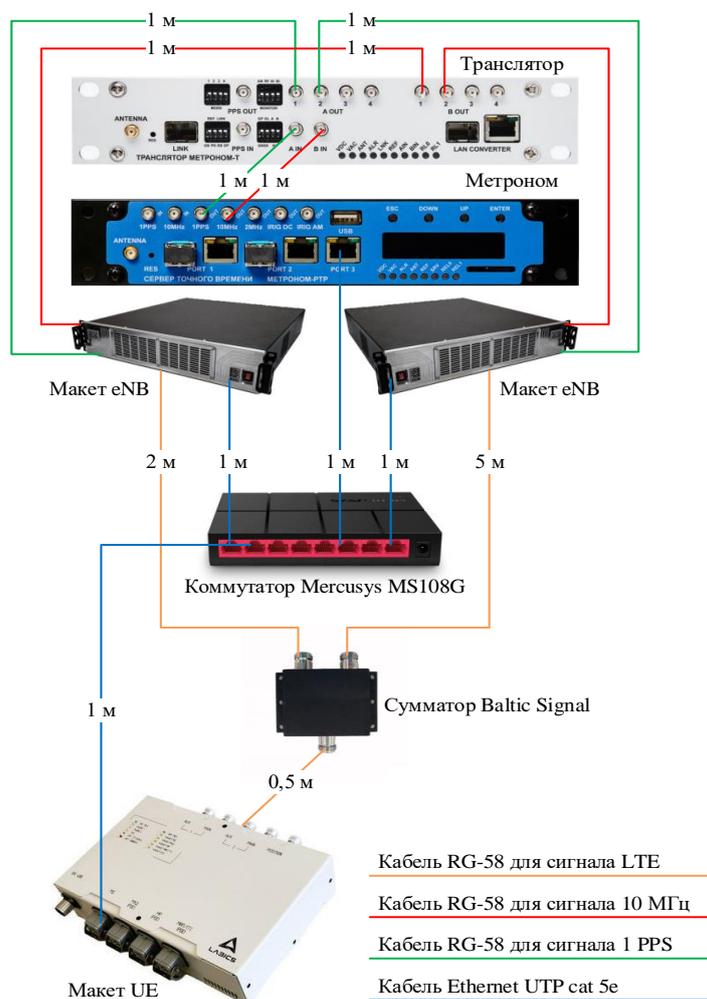


Рисунок 4

Вследствие выполнения описанных процедур был получен ожидаемый результат на графике разностей расстояний для двух макетов *eNB* (рис. 5).

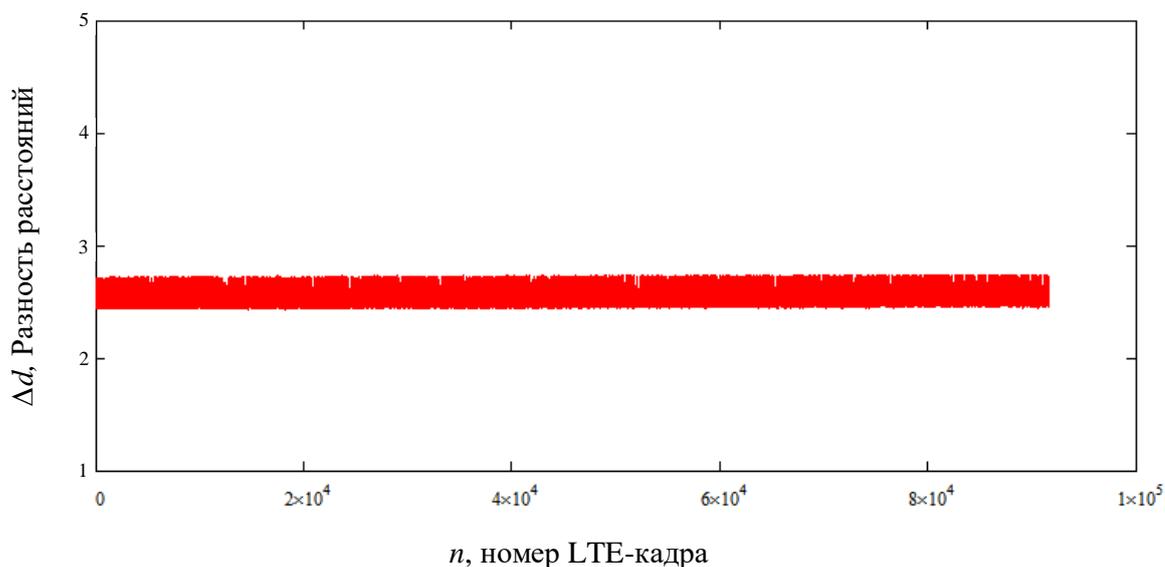


Рисунок 5

Анализ приведенного выше графика показывает, что вычислительная погрешность метода измерений [10] в сумме с приборной погрешностью трансивера (толщина линии) при использовании эталонной подсистемы синхронизации постоянна и составляет примерно ± 15 см, а погрешность синхронизации на продолжительном интервале времени отсутствует, что очевидно следует из постоянства среднего значения оценок разностей расстояний (рис. 5).

Однако, затухание в радиоканале делает невозможным стабильный прием сигналов синхронизации в контексте использования данной подсистемы на реальной сети мобильной связи, где *eNB* отстоят друг от друга на сотни метров. Следовательно, о доступности и точности услуги позиционирования при использовании такого подхода говорить не приходится.

Описание подсистемы синхронизации по протоколу PTP

Далее была выполнена проверка возможности синхронизации нескольких метрономов (по числу *eNB*) по сетевому протоколу синхронизации *PTP* (*Precision Time Protocol*) с точностью до единиц наносекунд. В такой подсистеме один метроном, установленный на опорной *eNB*, выступает ведущим (*Master*), а все остальные метрономы, установленные на соответствующих *eNB*, выступают в роли ведомых (*Slave*). Ведущий и ведомый метрономы соединялись между собой *Ethernet* патчкордом, а также для контроля и настройки подключались в локальную сеть через сетевой коммутатор. В ходе измерения на осциллографе сдвига фронтов двух сигналов 1 PPS с ведущего и ведомого метрономов, синхронизированных по протоколу *PTP*, удалось получить синхронизацию с точностью примерно 2,5 нс [27]. На рис. 6 и рис. 7 приводятся схема и осциллограмма измерения относительного сдвига фронтов двух сигналов 1 PPS с ведущего и ведомого метрономов. На рис. 7 цена деления шкалы времени равна 1,25 нс/дел. (крупные клетки).

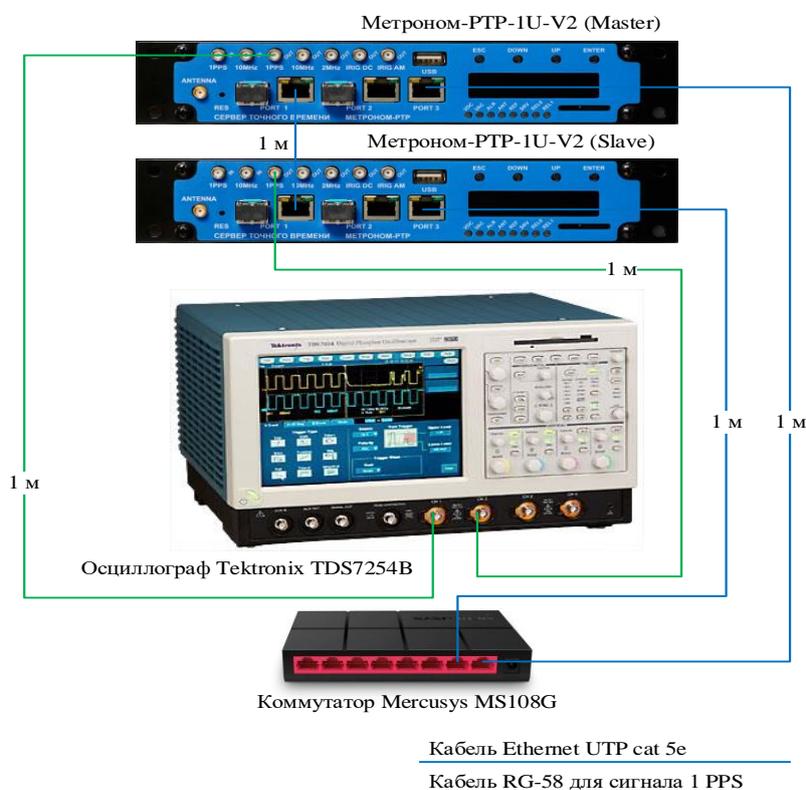


Рисунок 6

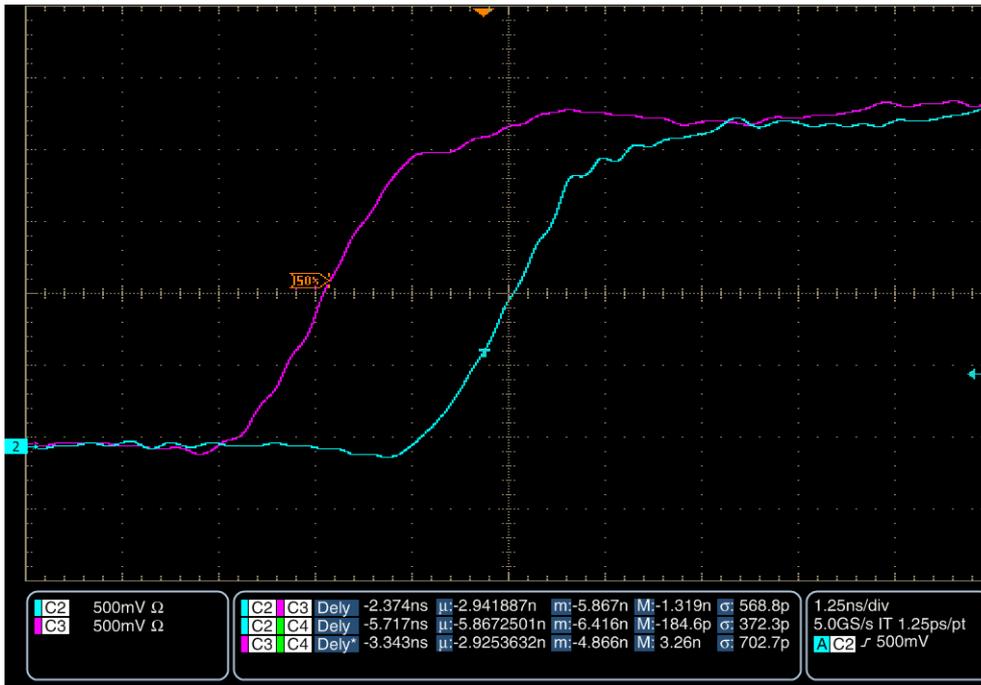


Рисунок 7

Однако в ходе длительного (12,5 час) наблюдения осциллограф зафиксировал плавный сдвиг фронта сигнала 1 PPS ведомого метронома относительно фронта соответствующего сигнала ведущего метронома в пределах 10 нс (рис. 8). Данное свойство уменьшает точность оценки координат *UE*.

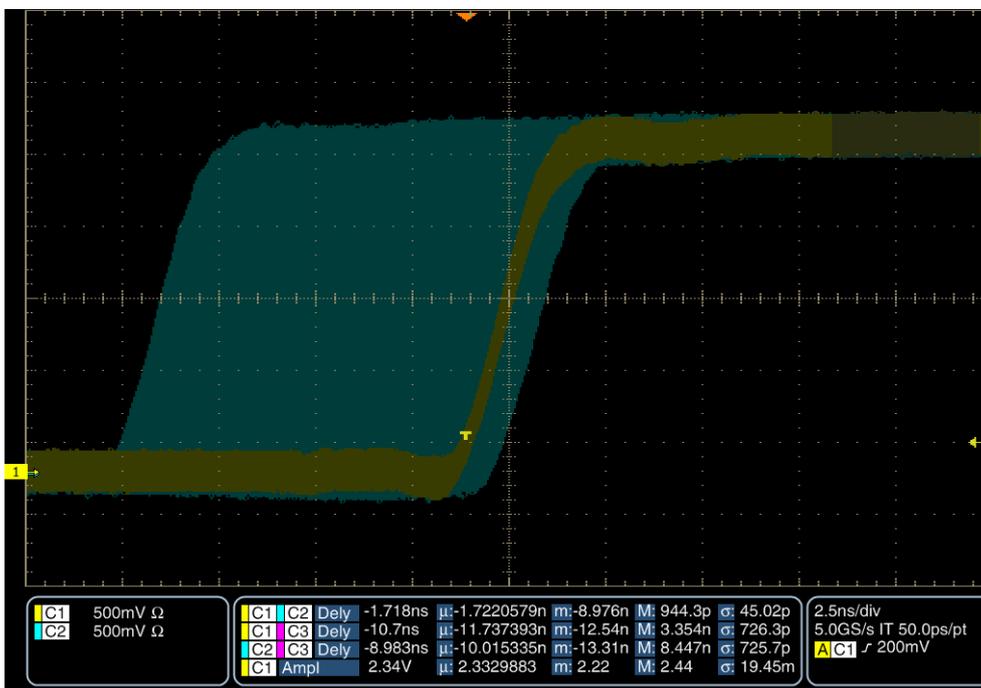


Рисунок 8

Для оценки влияния погрешности синхронизации на точность ОМП при использовании системы синхронизации метрономов по протоколу *PTP* была собрана схема, изображенная на рис. 9. Она отличается от схемы на рис. 4 заменой транслятора ведомым метрономом и конфигурацией обоих метрономов на работу в режиме *PTP* (для этого первые *Ethernet*-порты коммутируются патчкордом). На

рис. 10 представлен график разностей расстояний для двух макетов *eNB* при использовании подсистемы синхронизации по протоколу *PTP*.

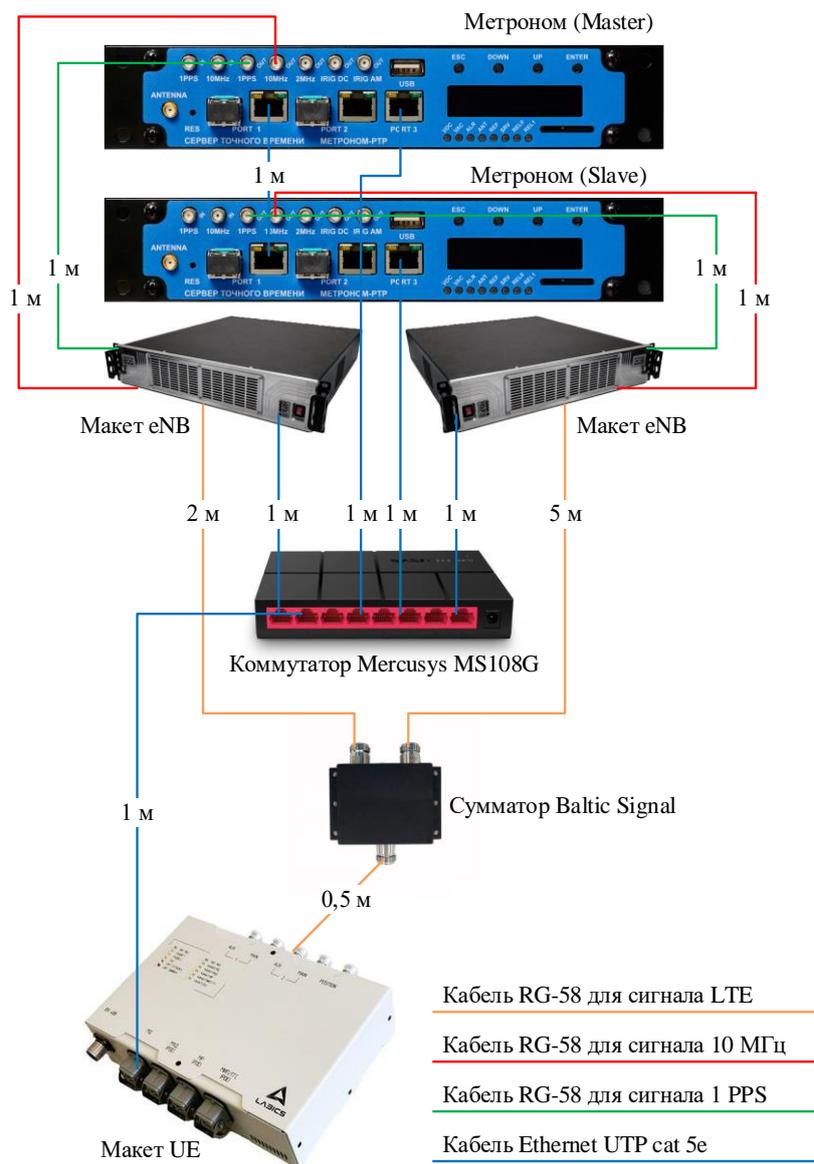


Рисунок 9

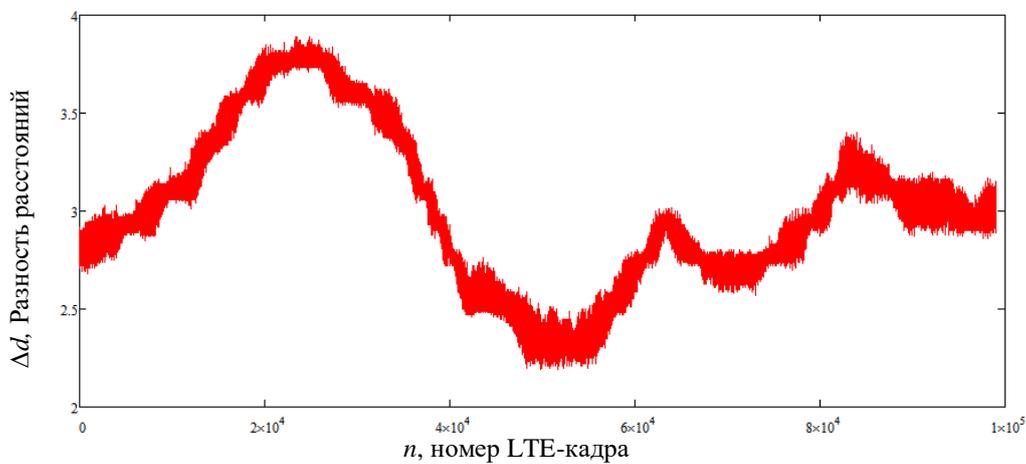


Рисунок 10

Анализ приведенного выше графика показывает, что вычислительная погрешность метода измерений [10] в сумме с приборной погрешностью трансивера (толщина линии) при использовании системы синхронизации метрономов по протоколу *PTP* равна погрешности при использовании эталонной системы синхронизации (рис. 5). Однако, если применить к данной последовательности отсчетов алгоритм скользящего среднего (или фильтр нижних частот), то можно заметить, что разности расстояний изменяются согласно некоторому неизвестному закону. Это изменение является погрешностью синхронизации, которая составляет в данном случае примерно $\pm 0,75$ м.

Компенсация погрешности синхронизации опорным приемником

В целях компенсации погрешности синхронизации в описанную [12] систему позиционирования вводится опорный приемник. Он является фиксированным элементом инфраструктуры системы позиционирования, следовательно, разности расстояний от пар *eNB* в данном местоположении опорного приемника должны быть детерминированными и постоянными. На стороне драйвера трансиверов *eNB* реализована возможность сдвига сигнала во времени с шагом 1 пс, при этом величина необходимого временного сдвига передается от опорного приемника к соответствующей *eNB* по *TCP*-сокету. Эта величина вычисляется таким образом, чтобы скомпенсировать отличие оценок разностей расстояний от детерминированного значения в данном местоположении опорного приемника. Схема работы алгоритма учета временных поправок приведена на рис. 11.

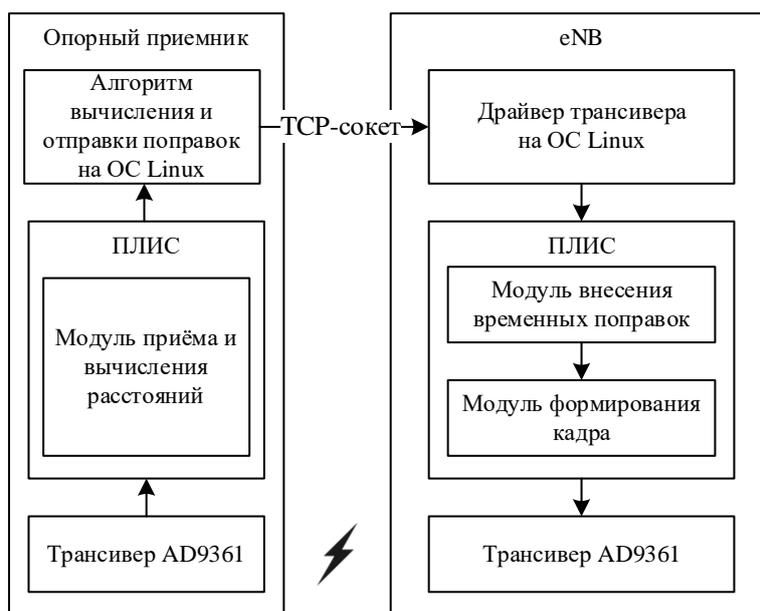


Рисунок 11

Экспериментальная апробация алгоритма компенсации

Экспериментальная апробация алгоритма компенсации погрешности синхронизации передатчиков *eNB* заключалась в задании ожидаемой разности расстояний на стороне опорного приемника (в данном эксперименте им выступает макет *UE* на рис. 9), отправки соответствующей этой разности расстояний временной поправки на *eNB* по *TCP*-сокету и наблюдении изменения величины разности расстояний на стороне опорного приемника. Схема эксперимента аналогична схеме на рис. 9. В данном эксперименте в алгоритме компенсации

погрешности синхронизации была задана ожидаемая разность расстояний $\Delta d = 3$ м.

На рис. 12 приведены графики разностей расстояний до и после применения алгоритма компенсации погрешности синхронизации.

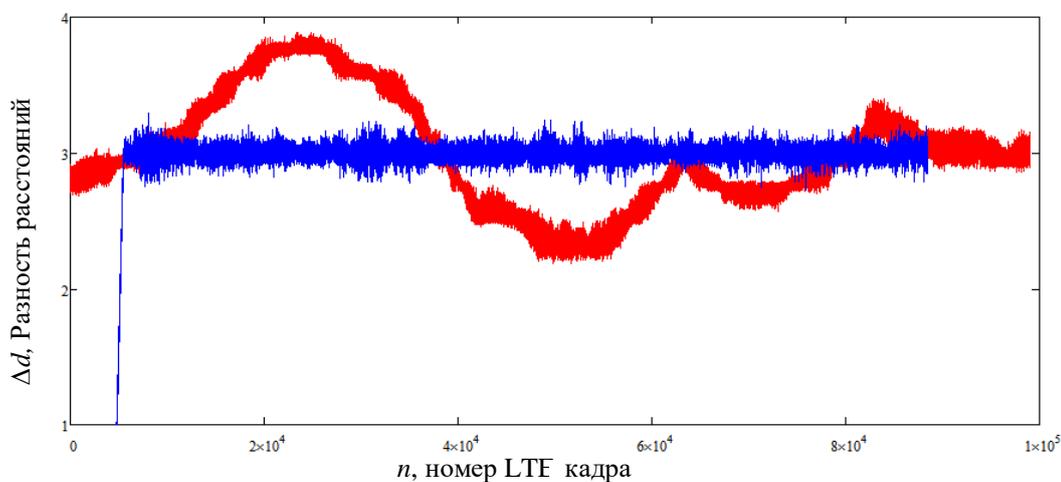


Рисунок 12

Из анализа рис. 12 очевидно следует, что применение алгоритма компенсации позволяет добиться точности синхронизации передатчиков *eNB*, которая сопоставима с синхронизацией от одного источника (рис. 5).

Заключение

В ходе проведения данного исследования была произведена оценка погрешности синхронизации, которую вносят серверы точного времени Метроном-PTP-1U-V2 в алгоритм приема и первичной обработки системы сетевого позиционирования *LTE*. Также был описан и экспериментально апробирован метод компенсации данной погрешности с использованием алгоритма автоматической временной подстройки передатчиков *eNB* опорным приемником путем отправки временного сдвига по *TCP*-сокету.

Литература

1. Zekavat R., Buehrer R.M. Handbook of position location: Theory, practice and advances, 2nd Edition. John Wiley & Sons, 2019.
2. Campos R.S., Lovisolo L. RF Positioning: Fundamentals, Applications, and Tools. Artech House, 2015.
3. Sand S., Dammann A., Mensing C. Positioning in Wireless Communications Systems. John Wiley & Sons, 2014.
4. Fischer S. Observed time difference of arrival (OTDOA) positioning in 3GPP LTE, Qualcomm White Paper, San Diego, CA, USA, Jul. 2014.
5. Fischer S. «5G NR positioning» in 5G and Beyond. Springer International Publishing, Mar. 2021, ch. 15.
6. 3GPP TS 36.214 V17.0.0 (2022-03) Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer; Measurements (Release 17).
7. 3GPP TS 38.215 V18.1.0 (2023-12) NR; Physical layer measurements (Release 18).
8. Рютин К.Е., Фокин Г.А. Особенности реализации приёмника системы позиционирования в сети *LTE* с помощью сигналов PRS методом OTDOA // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022): Сборник научных трудов XI Международной научно-технической и научно-методической конференции, 2022. – С. 339-344.

9. Рютин К.Е. Разработка демонстратора формирователя опорных сигналов стандарта LTE // Студенческая весна, 2022: 76-я Региональная научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, Санкт-Петербург, 24-25 мая 2022 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2022. – С. 29-34.
10. Фокин Г.А., Волгушев Д.Б. Использование SDR-технологии для задач сетевого позиционирования. Процедуры приема и обработки опорных сигналов LTE // Вестник СибГУТИ, 2023. – Т. 17. – № 1. – С. 52-65.
11. Фокин Г.А., Григорьев В.А., Рютин К.Е. Технология сетевого позиционирования LTE. Часть 3. SDR-демонстратор в лабораторных условиях // Первая миля, 2023. – № 3 (111). – С. 72-80.
12. Фокин Г.А., Григорьев В.А., Рютин К.Е. [и др.] Технология сетевого позиционирования LTE часть 4. SDR-демонстратор в полевых условиях // Первая миля, 2023. – № 4 (112). – С. 34-41.
13. Фокин Г.А., Рютин К.Е. Использование SDR-технологии для задач сетевого позиционирования: формирование информационного блока MIB // Экономика и качество систем связи, 2023. – № 2 (28). – С. 30-42.
14. Koelemeij J.C.J., Dun H., Diouf et al. C.E.V. «A hybrid optical–wireless network for decimetre-level terrestrial positioning» Nature, 2022. – V. 611. – № 7936. – pp. 473-478.
15. Dun H., Tiberius C.C., Diouf C., Janssen G.J. «Terrestrial precise positioning system using carrier phase from burst signals and optically distributed time and frequency reference», 2021 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, 2021. – pp. 510-524.
16. Diouf C., Janssen G.J.M., Kazaz T., Dun H., Chamanzadeh F. and Tiberius C.C. J. M. «A 400 Msps SDR platform for prototyping accurate wideband ranging techniques», 2019 16th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC), Bremen, Germany, 2019. – pp. 1-6.
17. Diouf C. Janssen G.J.M., Dun H., Kazaz T. and Tiberius C.C.J.M. «A USRP-Based Testbed for Wideband Ranging and Positioning Signal Acquisition», in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021. – V. 70. – pp. 1-15.
18. Prager S., Thriwikraman T., Haynes M., Stang J., Hawkins D. and Moghaddam M. «Ultra-wideband synthesis for high-range resolution software defined radar», 2018 IEEE Radar Conference (RadarConf18), Oklahoma City, OK, USA, 2018. – pp. 1089-1094.
19. Prager S., Haynes M.S. and Moghaddam M. «Wireless Subnanosecond RF Synchronization for Distributed Ultrawideband Software-Defined Radar Networks» in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020. – V. 68. – № 11. – pp. 4787-4804.
20. Yan H., Hanna S., Balke K., Gupta R. and Cabric D. «Software Defined Radio Implementation of Carrier and Timing Synchronization for Distributed Arrays», 2019 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2019. – pp. 1-12.
21. URL <https://kbmetrotek.ru/ptp-1u-v2/> (дата обращения – июнь 2024 г.).
22. URL <https://kbmetrotek.ru/metronom-t/> (дата обращения – июнь 2024 г.).
23. URL <https://gsm-repiteri.ru/prodazha/cable/kabel-5d-fb-pvc-chernyy> (дата обращения – июнь 2024 г.).
24. URL <https://www.tek.com/en/oscilloscope/csa7404b-manual/csa7404b-tds7704b-tds7404b-tds7254b-tds7154b-user-manual> (дата обращения – июнь 2024 г.).
25. URL <https://gsm-repiteri.ru/prodazha/deliteli/delitel-moshhnosti-bs-700-2700-1-2> (дата обращения – июнь 2024 г.).
26. URL <https://www.mercusys.com/en/product/details/ms108g> (дата обращения – июнь 2024 г.).
27. Fokin G., Ryutin K., Grigoriev V. and Bobrovskiy V. «Software-Defined Radio Network Positioning Technology Design. Synchronization Subsystem» 2023 Systems of

Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications
(SYNCHROINFO, Pskov, Russian Federation, 2023. – pp. 1-6.