

УДК 50.388.2

## МИНИМИЗАЦИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ СЕАНСА ВНЕШНЕГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ С ИСЗ НА ВЫСОКОЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ ОРБИТЕ

С.А. Колесник, И.В. Романов, М.В. Пикалов, Р.К. Хаитов, М.Ю. Филиппов

Поступила в редакцию 19.01.2016 г.

Рассмотрено несколько способов решения задачи о минимизации времени одного сеанса зондирования, не связанных с изменением аппаратной части бортового ионозонда. Описаны фазо-кодо-модулированные (ФКМ) радиосигналы и радиоимпульсы, планируемые к использованию в системе внешнего радиозондирования ионосферы с ИСЗ на высокоэллиптической орбите. Приведены расчеты ширины частотной полосы ФКМ сигналов, моделированных кодом Баркера различной длительности, и даются рекомендации по их использованию. Приведен расчет параметров приемной антенны, пороговой чувствительности приемника. Даны рекомендации к выбору оптимальной длительности кадра зондирования.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ИОНОСФЕРА, РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ, АРКТИКА, ИОНОЗОНД, КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ РАДИОПРИЕМ, КОД БАРКЕРА, ОПТИМИЗАЦИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ.

### ВВЕДЕНИЕ

Для контроля высокоширотной ионосферы предлагается использовать метод внешнего радиозондирования ионосферы с высокоэллиптического ИСЗ. Для увеличения периода нахождения ионозонда над Арктикой и регистрации данных с периодами, кратными земным суткам, предполагается использовать высокоапогейную солнечно-синхронную орбиту. Рассматривается вариант с периодом обращения 12 часов с апогеем и перигеем на высотах 36000 км и 500 км соответственно над Северным и Южным географическими полюсами.

### 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью статьи является минимизация времени одного сеанса зондирования — регистрации одной ионограммы. Возможны несколько способов достижения цели не связанных с изменением аппаратной части бортового ионозонда:

- использование зондирующих сигналов устойчивых к случайной помехе на частоте радиозондирования;
- использование накопления сигнала, корреляционный прием;
- использование равного числа периодов при зондировании на всех частотах;
- уменьшение количества частот в сеансе зондирования;
- одновременное излучение нескольких радиочастот;

### 2. АНАЛИЗ МОДУЛЯЦИИ ВОЗМОЖНЫХ ЗОНДИРУЮЩИХ СИГНАЛОВ

При вертикальном зондировании ионосферы Земли используются радиоимпульсы длительностью  $t_{imp} = (40-100)$  мкс. Использование фазо-кодовой манипуляции (ФКМ) последовательностью (кодом) Баркера (1) позволяет усложнить форму сигнала радиоимпульса и подавить боковые лепестки автокорреляционных функций [1] при корреляционном приеме.

$$\left| \sum_{i=1}^{N-m} a_i \cdot a_{i+m} \right| \leq 1, 1 \leq m < N \quad (1)$$

где,  $a_i$  представляет собой (+1) или (-1).

Всего таких последовательностей  $a_i$  девять, а самая длинная из них имеет длину тринадцать. Например, при использовании кода Баркера 4-го порядка с манипулированием фазы сигнала излучаемый радиоимпульс разбивается на четыре периода с длительностью каждого  $t_{bit} = 20$  мкс, в которых фаза сигнала будет меняться следующим образом ( $0^\circ, 180^\circ, 0^\circ, 0^\circ$ ) (рис. 1). Ещё 10 мкс отводится для обеспечения плавного нарастания и спада  $t_{front} = 5$  мкс радиоимпульса. Это необходимо для подавления боковых лепестков спектра Фурье радиоимпульса, и сосредоточение мощности излучения радиопередатчика на основной частоте. Тогда полная длительность излучаемого высокочастотного импульса будет  $t_{imp} = 90$  мкс. Радиоимпульс с такой фазовой манипуляцией будет более устойчив к помехам по сравнению с радиоимпульсом без модуляции (манипуляции).

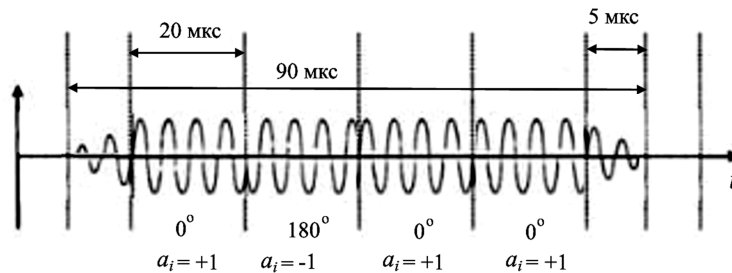


Рис. 1. Форма радиоимпульса бортового ионозонда с использованием фазовой манипуляции

Для импульса произвольной формы произведение его длительности  $\Delta t$  на ширину спектра  $\Delta f$  (база сигнала) является положительной величиной. Величина базы может изменяться в зависимости от формы импульса, минимальное значение  $B$  принимает при использовании импульса гауссовой формы. В инженерной практике [2] произведение  $\Delta t \times \Delta f$  принимают равной единице, так как независимо от формы сигнала в регистрируемой полосе частот  $\Delta f$  содержится 90% энергии сигнала [3]. Тогда известная длительность радиоимпульса  $t_{imp}$  позволяет рассчитать его ширину спектра  $\Delta f_{imp}$

$$\Delta f_{imp} = \frac{1}{t_{imp}} \quad (2a)$$

Ширину спектра фазово манипулированного радиоимпульса можно оценить из  $B$  случае фазовой манипуляции

$$\Delta f_{imp} = \frac{2}{t_{bit}} = \frac{2 \cdot N}{(t_{imp} - 2 \cdot t_{front})}, \quad (2b)$$

где,  $t_{bit}$  — длительность одного бита фазово манипулированного сигнала по коду Баркера,  $t_{front}$  — время нарастания или спада переднего и заднего фронтов радиоимпульса,  $N$  – порядок кода Баркера.

Из зависимостей на рис. 2 и выражений (2a) и (2b) можно заключить следующее:

1) ширина полосы ФКМ радиоимпульса на порядок больше чем ширина радиоимпульса без модуляции. Ширина импульса зависит от длительности  $t_{imp}$  и порядка кода Баркера  $N$ ;

2) при использовании ФКМ радиоимпульсов частотная полоса отраженного от ионосферы эхосигнала значительно шире, чем при использовании немодулированных радиоимпульсов, а значит, отношение сигнал шум модулированного сигнала будет ниже.

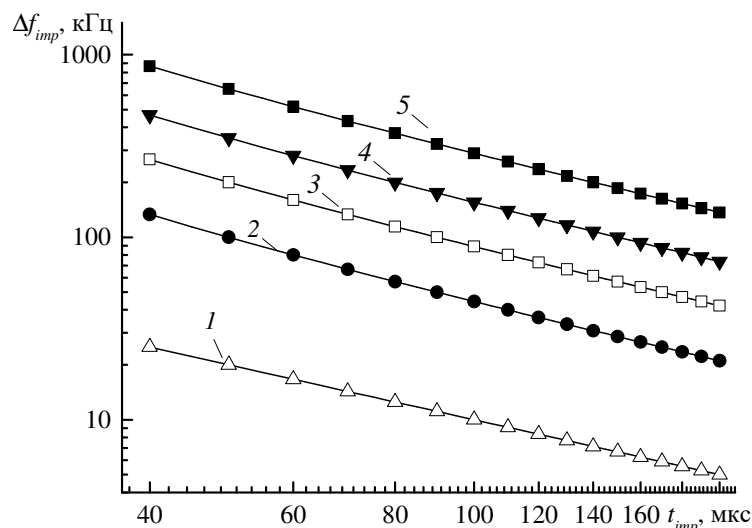


Рис. 2. Зависимость ширины полосы спектра радиоимпульса от его длительности: 1 — без модуляции; 2 — с фазовой манипуляцией (порядок кода Баркера  $N=2$ ); 3 — с фазовой манипуляцией ( $N=4$ ); 4 — с фазовой манипуляцией ( $N=7$ ); 5 — с фазовой манипуляцией ( $N=13$ )

Кроме того что на выбор частоты зондирования при ФКМ сигнале рекомендуется выбирать частоты с периодом кратным  $t_{bit}$ , либо выбирать величину  $t_{bit}$  из соображений обеспечения кратности текущей частоты зондирования.

ФКМ сигналы позволяют увеличить энергию радиоимпульса при неизменной спектральной ширине спектра сигнала, а значит уменьшить излучаемую мощность радиоимпульса бортового ионозонда. В режиме накопления радиоимпульсов увеличение энергии каждого из них приводит к уменьшению количества повторов. А значит, возможно, к уменьшению длительности сеанса зондирования. Таким образом, для бортового ионозонда, осуществляющего радиозондирование с высоты 20000–40000 км рекомендуется использовать ФКМ сигналы и корреляционный прием с последующим накоплением отраженных от внешней ионосферы сигналов.

### 3. АНАЛИЗ ПОРОГОВОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЁМНИКА

Расположенная на ИСЗ активная приёмная антенна (рис. 3) представляет собой диполь [4]. При размерах плеча диполя  $l = 3$  м, радиус плеча  $a = 1,5$  см, толщина  $d = 2,5$  мм, активное сопротивление антенны  $z_a$  имеет на частоте 0,5 МГц значение 15 кОм (рис. 4). Зависимость  $z_a(f)$  имеет ёмкостный характер, т.е. падает с ростом частоты, до частоты резонанса [5].

В многокаскадном усилителе коэффициент усиления по мощности первого каскада выбирается много больше единицы (в нашем случае 100), то отношение сигнал/шум приёмного тракта будет приблизительно равно отношению сигнал/шумам первого каскада. Поэтому первый каскад усиления характеризуется как можно меньшими шумами.

Широкополосность приёмной активной антенны ограничивается сверху широкополосностью предварительного усилителя [6], снизу частотой среза фильтра верхних частот образованного распределённой ёмкостью антенны и активным сопротивлением  $R$  входного каскада предварительного усилителя.

На рисунке 5 представлен расчёт зависимостей частоты среза  $f_{cp}$  антенны типа диполь (рис. 3) (левая шкала) и пороговая чувствительность приёмника  $u_{ш}$  [6–9] от значения сопротивления нагрузки  $R$ . С увеличением  $R$  частота среза уменьшается, а плотность напряжения шума  $u_{ш}$  растёт. Так для антенны с длиной плеча  $l = 3,05$  м частотам среза  $f_{cp}$  100 кГц и 500 кГц соответствуют пороговые чувствительности приёмника  $u_{ш}$  49 нВ/Гц<sup>0,5</sup> и 22 нВ/Гц<sup>0,5</sup>. Для снижения пороговой чувствительности приёмника необходимо уменьшать  $R$ . Без потери широкополосности это можно добиться увеличением линейных размеров ( $l$ ) антенны [4–9].

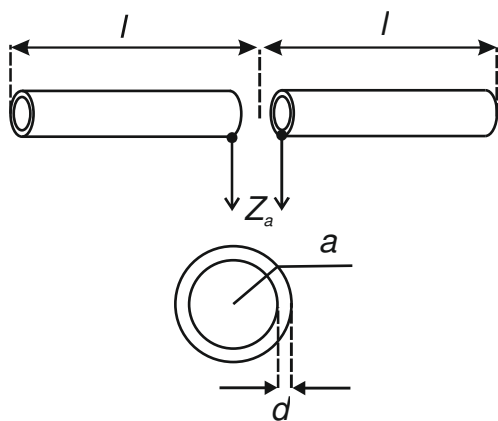


Рис. 3. Приёмная антенна — диполь

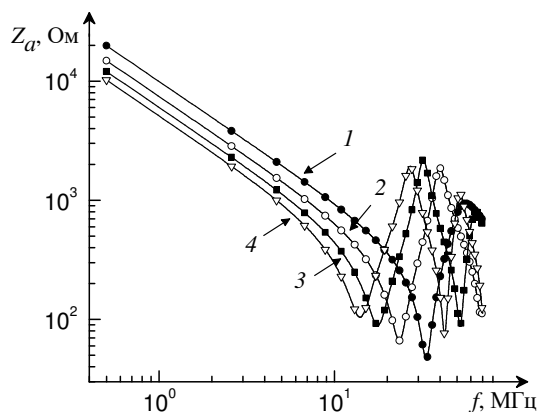


Рис. 4. Полное сопротивление одного плеча диполя:

1 —  $l = 2,05$  м; 2 —  $l = 3,05$  м;  
3 —  $l = 4,05$  м; 4 —  $l = 5,05$  м

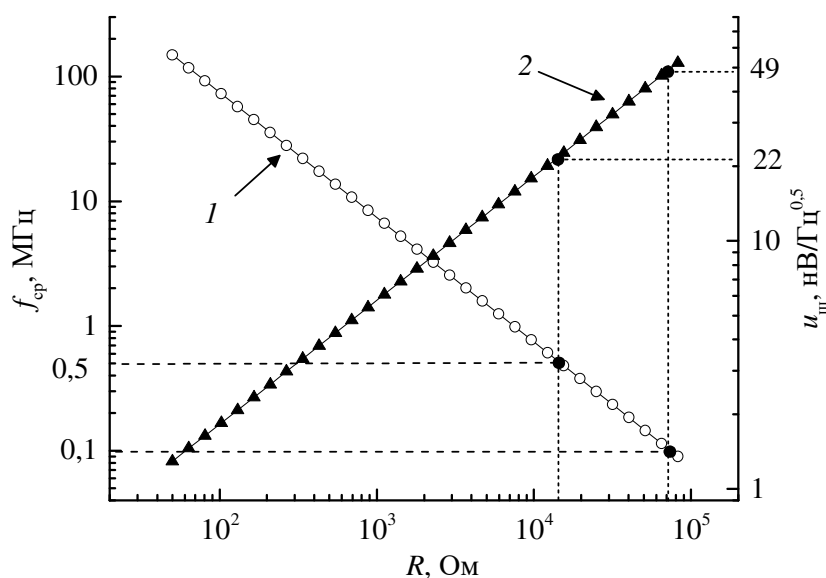


Рис. 5. Зависимость от сопротивления нагрузки  $R$  антенны: 1 – частоты среза  $f_{cp}$  (левая шкала) и 2 – пороговая чувствительность приёмника.

Знание величины пороговой чувствительности приёмника позволяет определить мощность шумов на входе приёмника. Так плотность мощности шума  $p_{ш} = 4,8 \cdot 10^{-14}$  мВт/Гц<sup>0,5</sup> (–133,2 дБм/Гц<sup>0,5</sup>) в полосе  $\Delta f = 20$  МГц мощность шумов  $P_{ш} = 2,15 \cdot 10^{-10}$  мВт (–96,6 дБм).

При корреляционном приеме ширина полосы измерений будет определяться шириной полосы радиоимпульса (рис. 2), что в свою очередь будет определять мощность шумов.

#### 4. ВЫБОР ЧАСТОТНОЙ СЕТКИ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ.

**Арифметическая прогрессия изменения частоты.** Фиксированное количество частот (кадре) можно определить следующим выражением:

$$N_k = \frac{f_{max} - f_{min}}{\Delta f},$$

где,  $f_{min} = 1$  МГц – минимальная частота,  $f_{max} = 20$  МГц – максимальная частота,  $\Delta f = 100$  кГц) – шаг изменения частоты. Тогда длительность кадра можно выразить

$$T_k = N_k \cdot t_{imp}. \quad (3)$$

**Геометрическая прогрессия изменения частоты.** Фиксированное число частот (кадре) можно определить следующим выражением

$$N_k = 1 + \frac{\lg(f_{\max}) - \lg(f_{\min})}{\lg(q)},$$

где,  $q$  – параметр изменения частоты.

На рисунке 6 представлены результаты расчёта разницы между двумя соседними частотами от текущего номера частоты в кадре для арифметической и геометрической прогрессии изменения частоты.

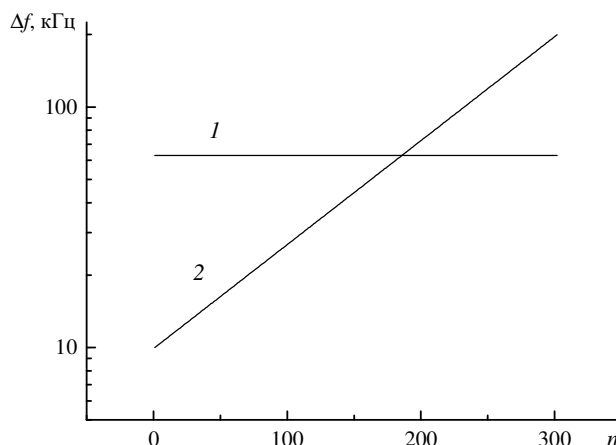


Рис. 6. Зависимость шага изменения текущей частоты от номера частоты в кадре при:  
1 — арифметической; 2 — геометрической прогрессии

Количество частот  $N_k$  в кадре равно 302 шт. Параметр  $q = 1,01$ , что соответствует 1% изменению частоты с ростом  $n$  (текущий номер частоты в кадре). Прямые пересекаются в точке  $n = 1$ , что соответствует частоте 6,3 МГц. Это означает, что на низких частотах плотность частот зондирования в случае геометрической прогрессии будет больше, чем для арифметической прогрессии изменения частоты зондирования. Для высоких частот будет обратная ситуация.

Каждый из способов изменения частоты имеет свои преимущества и недостатки. Когда частота отсечки слоя F2 находится выше частоты 6,3 МГц, то выгодно использование арифметической прогрессии, так как количество частот измерений в этой части спектра больше. Если же частота отсечки находится ниже частоты 6,3 МГц, то выгодно использовать геометрическую прогрессию, так как количество частот измерений больше арифметической прогрессии, а значит точность определения полосы отсечки выше. При этом использование арифметической прогрессии становится не эффективным. Для того чтобы обеспечить сравнимую точность измерения частоты отсечки с геометрической прогрессией необходимо уменьшать шаг приращения частоты для всего кадра. А это, в свою очередь, влечёт увеличение времени сеанса зондирования.

## 5. ОПТИМИЗАЦИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ КАДРА

Исследуем другие варианты уменьшения длительности кадра. Рассмотрим случай, когда длительность радиоимпульса не постоянна, а зависит от частоты зондирования  $t_{imp}(f)$ . Идея заключается в обеспечении постоянства количества периодов в радиоимпульсе. При этом радиоимпульсы с низкой частотой будут иметь большую длительность, чем радиоимпульсы высокой частоты. В условиях, когда размеры передающей антенны бортового ионозонда ограничены, эффективность изучения низких частот будет ниже, чем высоких. Скорректировать данный эффект можно увеличив энергию низкочастотных радиоимпульсов за счёт увеличения их длительности. Также, существует возможность уменьшить длительность кадра.

Радиоимпульс можно представить следующим образом:

$$s(t) = h(t) \cdot A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) = h(t) \cdot A_0 \sin(2\pi f_0 t + \varphi_0) = h(t) \cdot A_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} \cdot t + \varphi_0\right),$$

где,  $f_0$  — несущая частота радиоимпульса,  $\omega_0$  — циклическая частота,  $T_0$  — период несущей частоты,  $\varphi_0$  — начальная фаза.  $A_0$  — амплитуда несущей частоты,  $h(t)$  — огибающая радиоимпульса.

Пусть  $m$  — число целых периодов несущей частоты  $f_0$  в радиоимпульсе. В случае радиоимпульсов постоянной длительности

$$m = f_0 \cdot t_{imp} = f_0 \cdot const ,$$

длительность кадра вычисляется по формуле (3). Если используются радиоимпульсы постоянного периода

$$t_{imp} = mT_0 = \frac{m}{f_0} = \frac{const}{f_0} ,$$

Длительность кадра выражается как

$$T_k = \sum_{i=1}^N t_{imp,i} = \sum_{i=1}^N \frac{m}{f_{0,i}} .$$

Зависимости длительности кадра при геометрической или арифметической прогрессии увеличения частоты, представлены для случая фиксированного количества периодов  $m=200$  (рис. 7б), или фиксированного количества частот  $N_k=302$  (рис. 7а).

Из рисунка 7б видно, что для  $m=200$ , при использовании 300 частот выигрыш в длительности кадра относительно базового алгоритма заполнения составляет для геометрической прогрессии 30%, а для арифметической прогрессии 60%.

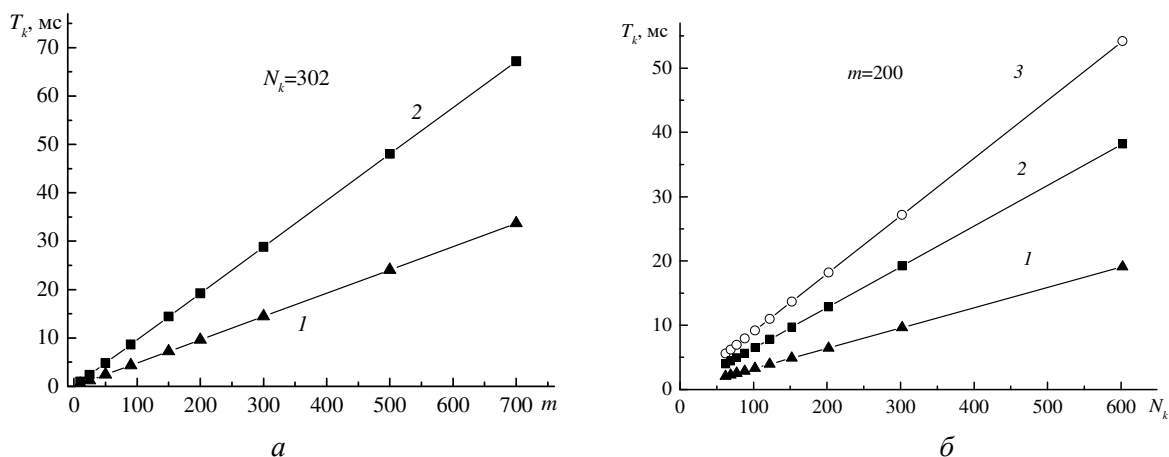


Рис. 7. Зависимости длительности кадра от числа периодов в радиоимпульсе (а) и количества радиоимпульсов в кадре (б) для:

- 1 – постоянного количества периодов и геометрической прогрессии,
- 2 – постоянного количества периодов и арифметической прогрессии;
- 3 – уровень длительности, для базового алгоритма заполнения ( $T_{umt} = 90$  мкс для всех частот)

## ВЫВОДЫ

– Для минимизации длительности сеанса получения одной ионограммы с ИСЗ на высокоэллиптической орбите целесообразно использовать ФКМ сигналы и корреляционный прием в режиме накопления радиоимпульсов.

- В работе представлен алгоритм расчета шумовых характеристик приемного устройства ионозонда с учетом параметров ФКМ сигнала: порядок кода Баркера, ширина полосы, длительность импульса.
- При выборе частотной сетки зондирования необходимо руководствоваться, в том числе, возможным выигрышем в длительности кадра. Если нет необходимости учащать сетку в каких либо частотных интервалах, оптимальным будет выбор арифметического закона изменения частоты. При использовании 300 частот и 200 периодов одной частоты, это приведет к выигрышу до 60% в времени зондирования в сравнении с иными алгоритмами заполнения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-29-06052.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Barker R. H. Group synchronizing of binary digital sequences. *Communication Theory*, London, Butterworth, 1953, pp. 273–287.
2. Гришин Ю. П., Ипатов В. П., Казаринов Ю. М. и др.; Под ред. Ю.М. Казаринова. Радиотехнические системы: Учеб. для вузов по спец. «Радиотехника». — М.: Высш. шк., 1990. 496 с.
3. Финкельштейн М. И. Основы радиолокации: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1983. — 536 с
4. Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терешин О.Н. Антенны УКВ. — М.: Связь, 1977. 384 с.
5. Романов И.В., Колесник С.А., Митаев А.А., Хаитов Р.К., Кантышев А.В. Характеристики приёмной антенны комплекса зондирования ионосферы // Известия вузов. Физика. 2015. Т. 58, № 10/3. С. 58–61
6. Хорвиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: Пер. с англ. Изд. 2-е. М.: Издательство БИНОМ. 2014. 704 с.
7. Бриндли К., Карр Дж. Карманный справочник инженера электронной техники / Пер. с англ. 3-е изд. стер. — М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. 480 с.
8. Дэвис Дж., Карр Дж. Карманный справочник радиоинженера / Пер. с англ. 4-е изд. стер. М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. 544 с.

## MINIMIZATION DURATION OF IONOSPHERE RADIO SOUNDING SESSION BY SATELLITE BASED IONOSONDE IN HIGHLY ELLIPTICAL ORBIT

Kolesnik S.A., Romanov I.V., Pikalov M.V., Khaitov R.K., Filippov M.Y.

Several ways of solving problem of one radio-sounding session duration minimization are described, excluding changing hardware onboard ionosonde. PCM-radio signals which are to be used in the system of external radiosounding of the ionosphere with using satellites in highly elliptical orbit are described. The calculations of the frequency bandwidth of PCM signals, modeled by a Barker code of different duration are given. The calculations of the parameters of the receiving antenna and the threshold sensitivity of the receiver are given. Recommendations to the selection of the optimum duration of the sensing frame are given.

**KEYWORDS:** IONOSPHERE, RADIO SOUNDING, ARCTIC, IONOSONDE, CORRELATION RADIO RECEPTION, BARKER CODE, OPTIMIZATION OF RADIO SOUNDING SESSION DURATION.