

УДК 004.896

DOI 10.52167/1609-1817-2023-128-5-260-267

Н.Б. Богуспаев¹, Ш.К. Кадиркулов², А.С. Раскалиев³,
Ш.М. Кобдикова⁴, А.И. Самсоненко³,

¹ТОО Алматинский Институт Технологий, Алматы, Казахстан

²Военный институт Сухопутных войск имени генерала-армии С. Нурмаганбетова
Министерства обороны РК, Алматы, Казахстан

³ДТОО Институт космической техники и технологии, Алматы, Казахстан

⁴Национальная академия наук Республики Казахстан, Алматы, Казахстан
E-mail: nurlanbsv@mail.ru

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СХЕМЫ ОЦЕНКИ ЭНЕРГИИ ОТРАЖЕННОГО РАДИОСИГНАЛА ГНСС ОТ ВОЗДУШНОГО ОБЪЕКТА

Аннотация. В данной статье разработан процесс вычислительной схемы оценки энергии отраженного от воздушного объекта и принятого на антенну навигационного приемника радиосигнала ГНСС. Для успешной реализации задачи радиолокации воздушных объектов с использованием бистатической локации воздушных объектов с использованием спутниковой навигационной системы ГНСС, необходимо предварительно оценить мощность или энергетический потенциал спутникового навигационного сигнала, отраженного от воздушного объекта, а затем принятого на антеннах спутниковой аппаратуры потребителей. Полученные результаты, представленные в виде разработанных вычислительных схем, лягут в основу алгоритмического и программного обеспечения системы пассивной радиолокации и позволят определить требования к ее техническому обеспечению, проводимых в рамках грантового проекта МОН РК № AP09260581.

Ключевые слова. ГНСС, эффективная площадь рассеяния, спутниковая радионавигационная система, радиолокационная система, наземный приемник.

Введение.

С развитием радиолокации в середине 1990-х годов начали активно разрабатывать бистатические радиолокационные системы, где передатчик и приемник отслеживают события независимо друг от друга и ежегодно обнаруживают антенны. Одним из важных аспектов этой технологии является использование отраженных сигналов от воздушных объектов для определения их координат и характеристик. В рамках данной работы исследуется процесс измерения отраженного сигнала ГНСС от воздушного объекта и возможность использования информации для определения координат объекта. Мы также рассмотрели возможность использования спутниковых радиосигналов в качестве входных сигналов для бистатической радиолокации.

Как известно, факторами, влияющими на определение точности местоположения приемника спутниковых навигационных сигналов ГНСС, являются следующие:

- ионосферные и тропосферные задержки. По мере наблюдения за атмосферой замедляется сигнал;
- ошибка приемника;
- многолучевой прием;
- геометрия видимых спутников, определяемая взаиморасположением спутников в каждый момент времени;

Погрешности от большого количества радиоволн при распространении радиоволн переотражаются радиоволнами с высоты на трассе распространения спутникового сигнала

на объектах. Они направляются, когда сигналы, контролируемые со спутника, отражаются от соседних предметов, воздействуют на различные объекты, вплоть до того, что они попадают на антенну приемника. В результате сигнал спутника проходит к приемнику не по прямой линии, как это должно быть, а происходит более коротким путем. В результате этого время распространения отраженного сигнала преобразуется во время поиска прямого сигнала на антенну спутникового приемника. Поэтому приёмник процессора «думает», что находится дальше от спутника, чем на самом деле.

Увеличение времени передачи отраженного сигнала приводит к возникновению ошибки определения. Таким образом, Ошибки многолучевости могут одновременно относиться и к ошибкам категории, к ограничениям, связанным с передачей транспортного сигнала, и к ошибкам приемника.

Однако отрицательные свойства многолучевости, связанные с переотражением спутникового навигационного сигнала от различных объектов, можно использовать для решения задач радиолокации воздушных объектов.

Одним из возможных источников подсветки для радиолокационных источников могут быть сигналы спутниковых навигационных систем. В любом месте наземного шара доступны навигационные сигналы ГНСС. Поэтому любой объект, Находящийся в воздухе является переотражателем сигналов ГНСС и, соответственно, панелью для спутниковых навигационных приемников. Поэтому отрицательный эффект многолучевости в данном случае может выполнять роль подсветки для навигационного приемника ГНСС, который может проявиться в движении пассивной радиолокационной станции.

Основная цель этой работы — разработать вычислительную схему, умеющую эффективно оценивать отраженные сигналы от воздушных объектов и использовать эту теорию для определения их координат. Полученные результаты будут внедрены в алгоритмическое и программное обеспечение системы пассивной радиолокации. Это также соответствует техническим требованиям для данной системы.

В данной работе используется бистатическая радиолокация с использованием спутниковых навигационных сигналов. Бистатическая радиолокация использует электромагнитную энергию, рассеивающую цели в разных направлениях, когда она излучается зондирующими сигналами. На приемной позиции регистрируются сигналы, отражаемые от целей, но излучаемые передатчиком, например, радио- или телевизионные передатчики, сотовые сети и, в последние годы, сигналы ГНСС. Эти сигналы подсвета являются посторонними при использовании системы. Такие системы объединяют идеи пассивной и активной локации: от первой — отсутствие собственного передатчика, от второй — приём отражаемых сигналов. Для этого мы разрабатываем вычислительную схему, которая учитывает различные параметры, такие как эффективная площадь рассеяния объекта, расстояние до объекта и характеристики расстояния приемной антенны. Полученная информация может быть использована для определения координат воздушной точки. [1]

Следует отметить, что в мире интерес к пассивным РЛС с использованием в качестве подсвета навигационных сигналов проявляется пока на теоретическом уровне и на уровне создания экспериментальных макетов. Поэтому данное направление исследований является достаточно актуальным и новым в рамках создания систем пассивной радиолокации на базе использования спутниковых радионавигационных сигналов ГНСС.

Материалы и методы.

Мощность сигнала прямого распространения, излученного передатчиком НС и принятого приемником СРНС, будет определяться выражением (1.1):

$$P_{\text{прм}} = \frac{P_{\text{прд}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \lambda^2}{(4\pi)^2 D_{\text{сп}}^2 K_{\text{АТ}} K_{\text{пол}} K_{\text{пр}}}, \quad (1.1)$$

где $K_{\text{АТ}} = 2\text{дБ}$ – коэффициент затухания в атмосфере;
 $K_{\text{пол}} = 1\text{дБ}$ – коэффициент затухания, связанный с поляризационными потерями;
 $K_{\text{пр}} = 4\text{дБ}$ – прочие потери;
 $P_{\text{прд}}$ – мощность излучения передатчика навигационного сигнала ГНСС;
 $G_{\text{прд}}$ – коэффициент направленного действия передающей антенны;
 $G_{\text{прм}}$ – коэффициент направленного действия приемной антенны;
 $D_{\text{сп}}$ – дальность радиолинии «спутник - приемник»;
 λ – длина волны навигационного сигнала.

Для сигнала навигационного спутника ГНСС, рассеянного целью и принятого навигационным приемником, мощность будет определяться с учетом радиолокационных свойств цели согласно формуле (1.2):

$$P_{\text{прм.ц}} = \frac{P_{\text{прд}} G_{\text{прд}} G_{\text{прм}} \lambda^2}{(4\pi)^3 D_{\text{с-ц}}^2 D_{\text{ц-п}}^2 K_{\text{АТ}} K_{\text{пол}} K_{\text{пр}}} S_{\text{ц}}, \quad (1.2)$$

где $D_{\text{с-ц}}$ – дальность радиолинии «спутник - цель»; $D_{\text{ц-п}}$ – дальность радиолинии «цель – приемник»; $S_{\text{ц}}$ – эффективная площадь рассеяния цели.

Эффективная площадь рассеяния (ЭПР) является важнейшей радиолокационной характеристикой цели, от значения которой зависит уровень амплитуды или энергии отраженного от воздушного объекта.

Для однопозиционной радиолокации ЭПР отражает способность цели рассеивать электромагнитную энергию в направлении, противоположном направлению облучения. В рассмотренной задаче речь идет о бистатической радиолокационной системе (БСРЛС), в которой при описании отражающей способности цели необходимо учитывать возможные различные направления от цели на передающую (навигационный спутник) и на приемную (наземный приемник) позицию. Такой характеристикой является бистатическая ЭПР цели $S_{\text{ц}}$, значение которой будет зависеть от величины бистатического угла от цели на передающую и на приемную позиции [2].

При малых бистатических углах $\beta \leq 130^\circ$ значение бистатической ЭПР заданной цели можно найти на основании известной ЭПР для однопозиционной радиолокации в соответствии с теоремой эквивалентности [3]. Согласно этой теореме, для бистатической РЛС с рабочей длиной волны λ бистатическая ЭПР цели $S_{\text{ц}}$ будет совпадать с ЭПР Y эквивалентной цели для однопозиционной РЛС, находящейся на биссектрисе бистатического угла β и работающей на длине волны $\lambda/\cos(\beta/2)$. При этом площадь эквивалентной цели определяется частью площади реальной цели, освещенной передающей позицией и видимой из точки приемной позиции.

Особый интерес при определении бистатической ЭПР представляет эффект так называемой «просветной» локации, проявляющейся на бистатических углах $\beta \geq 130^\circ$, что характерно для рассмотренной задачи.

В соответствии с теорией электромагнитного поля, при помещении на пути распространения электромагнитной волны абсолютно чёрного тела конечных, но больших

по сравнению с длиной волны размеров $l \gg \lambda$, позади тела появится теневое поле рассеяния. У реальных целей помимо теневого возникает также собственное поле рассеяния, которое, в соответствии с физической теорией дифракции, возбуждается токами, наведёнными на поверхности цели падающей волной.

Теневое и собственное поле рассеяния разнесены в пространстве. Теневое поле сосредоточено в узком телесном угле вблизи бистатического угла $\beta = 180^\circ$, так что его можно называть полем «рассеяния вперёд». Ввиду того, что собственное поле рассеяния намного слабее теневого, при анализе полного поля рассеяния влиянием токов на поверхности цели пренебрегают. В этом случае можно считать реальную цель абсолютно чёрным телом, создающим только теневое поле рассеяния [4].

Отсюда следует, что в приближении физической оптики теневое поле цели не зависит от формы поверхности и полностью определяется теневым контуром цели, как и поле абсолютно чёрного тела. Кроме того, на теневое поле не влияет и материал поверхности цели, в частности радиопоглощающие покрытия, которые существенно ослабляют собственное поле рассеяния. Это очень важно для задачи обнаружения малозаметных целей, построенных по технологии «Стелс».

Результаты и обсуждения.

Согласно проведённым исследованиям, бистатическая ЭПР для удалённой точки приёма при бистатических углах $\beta = 130^\circ - 180^\circ$, определяется по формуле (1.3):

$$s_{\text{ц}}(r) = \frac{4\pi}{\lambda^2} \left| \int_{S_t} \exp \left[j \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) cr \right] dS \right|^2, \quad (1.3)$$

где S_t – эквивалентная плоская синфазная апертура, перпендикулярная направлению распространения падающей волны и ограниченной проекцией на эту плоскость теневого контура цели;

c – радиус-вектор произвольной точки апертуры S_t ;

r – орт в направлении на приёмную позицию.

Из (1.3) видно, что в предельном случае, когда $\beta = 180^\circ$ и $c \perp r$, ЭПР достигает максимума и определяется по формуле (1.4) [4,5]:

$$s_{\text{ц}}(180^\circ) = 4\pi \left(\frac{S_t}{\lambda} \right)^2. \quad (1.4)$$

Одной из важнейших характеристик БСРЛС, непосредственно связанных с мощностью сигнала, рассеянного целью, является зона действия бистатического звена, под которой понимается область пространства, в котором должна находиться цель, чтобы мощность полезного сигнала на входе приемника была не хуже граничного уровня. В настоящее время чувствительность приемников ГНСС обеспечивает прием навигационного сигнала мощностью не хуже -160 дБ/Вт, однако современные зарубежные и отечественные разработки позволили увеличить чувствительность приемников СРНС до -180 дБ/Вт и -210 дБ/Вт [6].

Кроме того, при выборе граничного уровня сигнала необходимо учесть, сигнал на выходе коррелятора будет промодулирован корреляционной функцией псевдослучайной последовательности дальномерного кода, уровень боковых лепестков которой $1/L$ зависит от длины L псевдослучайной M -последовательности. К примеру, для сигнала стандартной

точности СРНС ГЛОНАСС длина М-последовательности составляет 511 бит, что соответствует уровню боковых лепестков корреляционной функции -27 дБ по мощности.

Для уверенной регистрации сигнала, рассеянного целью, при временной селекции «полезных» сигналов на фоне коррелированной помехи в виде более мощного сигнала прямого распространения необходимо, чтобы на выходе коррелятора уровень главного лепестка сигнала, рассеянного целью, был значительно выше уровня боковых лепестков сигнала прямого распространения. Задавшись граничным уровнем рассеянного целью сигнала -180 дБ/Вт, можно обеспечить существенное превышение аппаратной границы чувствительности перспективных приемников СРНС (-210 дБ/Вт) и значительное (7 дБ ≈ 5 раз) превышение уровня боковых лепестков сигнала прямого распространения.

В качестве примера рассмотрим прямоугольную линейную фазированную антенную решетку и оценим ее геометрические размеры, необходимые для достижения следующих характеристик ФАР [6]:

- коэффициент усиления ~ 40 дБ;
- ширина главного лепестка диаграммы направленности 1,5 градуса по вертикали и горизонтали;
- коэффициент полезного действия ФАР ~ 0,9.

Пусть шумовая температура усилительного тракта приемника будет принята равной 5К, что соответствует усилителю на Si-Ge транзисторах, охлажденному до температуры 4К [7]. Результаты расчета уровня шумов на входе приемного устройства приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Мощность шума на входе приемного устройства

	GPS		ГЛОНАСС	
	f1(C/A)	f2(P)	f1(CT)	f2(BT)
РШ, дБВт	-153,961	-143,961	-156,976	-146,976

При этом геометрические размеры ФАР определялись по формуле (1.5):

$$S_{\text{геом}} = \left(\frac{102^0}{2\theta_{0,7}} d \right)^2, \quad (1.5)$$

где $2\theta_{0,7} = 51^0 \frac{3}{Nd}$ – ширина диаграммы направленности по уровню 0,707 [32];

3 – коэффициент полезного действия фазированной антенной решетки;

N – количество излучателей в антенной решетке;

$d = 0,5\text{л}$ – расстояние между соседними излучателями.

С учетом того, что коэффициент усиления антенны определяется по формуле (1.6):

$$K_y = \left(\frac{4\rho S_{\text{геом}}}{\text{л}^2} \right)^3, \quad (1.6)$$

и исходя из сформулированных требований 1)-3) к характеристикам ФАР, для несущей частоты f1 GPS (сигнала C/A) были получены следующие значения: $N=68*68=4624$, $S_{\text{геом}}=41,919$ кв. м; $KY=41,2$ дБ.

Антенну с достаточно большой площадью проблематично разместить на мобильной технике и возникают ограничения в расположении системы. Но если

сформировать антенную решетку из четырех фрагментов по 10,5 м², то вполне возможно ее размещение на автомобильной технике.

В группировке спутников ГНСС энергетические параметры для типовой радиолинии практически одинаковые. Мощность излучения передатчиков $P_{\text{прд}} = 64$ Вт, коэффициент направленного действия передающей антенны $G_{\text{прд}} = 10$ дБ, коэффициент направленного действия приемной антенны $G_{\text{прм}} = 42,2$ дБ. Дальность радиолинии «спутник – приемник» $R_{\text{СЦ}} = 20200$ км (наибольшая высота спутников), дальность радиолинии «цель – приемник» $R_{\text{ЦП}}$ для исследований была принята в пределах от 1 до 100 км.

Приведенные расчеты не наблюдают за общей доплеровской сдвига частотой принимаемого сигнала, а также помехами, обусловленными сигналом прямой передачи, значительно превышающими интенсивность отражения от цели и проникающими в приемный тракт через боковые лепестки ФАР. Также большую роль играет тот факт, что на данный момент опорный сигнал-коррелятор точно соответствует форме сигнала, отраженному от цели. Для приема боковых лепестков приемной антенны применяются различные конструктивные меры [8].

Заключение.

Объектом исследования являются спутниковые навигационные радиосигналы глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС), отраженные от воздушного объекта. В результате исследования были получены вычислительные схемы оценки энергии отраженного от воздушного объекта и принятого на антенного навигационного приемника радиосигналов ГНСС. Область применения – полученные результаты в виде разработанных вычислительных схем и программных модулей имитационного моделирования лягут в основу алгоритмического и программного обеспечения системы пассивной радиолокации и позволят определить требования к ее техническому обеспечению.

Благодарность.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан по проекту № AP09260581.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кирюшкин В.В., Черепанов Д.А. Бистатическая локация воздушных целей сигналами спутниковых радионавигационных систем. Вестник Воронежского государственного технического университета, 2010 год.
- [2] Быстров Р.П. Методы современной радиолокации и обработки сигналов / Р.П. Быстров, Е.В. Кузнецов, А.В. Соколов, Ю.С. Чесноков // Успехи современной радиоэлектроники. - 2005. - №9. - с.11-26.
- [3] Ксендзук А.В. Неизлучающая радиолокационная система, основанная на приёме отражённых сигналов навигационных систем ГЛОНАСС и GPS /А.В. Ксендзук, В.Ф. Фатеев, С.А. Попов // Труды ОАО «МАК «Вымпел». Сборник статей. М.: Радиотехника – 2009. – с.60-66.
- [4] Беспалый В. Д. Перспективная многопозиционная радиолокационная система на основе сигналов спутниковых радионавигационных систем // Материалы II Всероссийской научной конференции с международным участием: Красноярск, 2007, с.271-273.
- [5] Динамика радиоэлектроники-3. / Под общ. ред. Ю.И. Борисова. - М.: Техносфера, 2009. - 392 с.

- [6] Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. - М.: Радио и связь, 1991. - 609 с.
- [7] Интерфейсный контрольный документ ГЛОНАСС. КНИЦ МО РФ. 5-я ред., 2002. - 60 с.
- [8] Черняк В.С. Многопозиционная локация. - М.: Радио и связь, 1993. - 416 с.
- [9] Бакулев П.А. Радиолокационные системы. - М.: Радиотехника, 2004. - 320 с.
- [10] Сверхчувствительный программный навигационный приёмник SPIRIT Telecom // www.spirit-telecom.ru. — URL: http://www.spirit-telecom.ru/super_sensitive_receiver.html - (дата обращения 10.07.2010 г.)

Нурлан Богуспаев, Директор, Алматы Технологиялық Институты ЖШС, Алматы, Қазақстан, nurlanbsv@mail.ru

Шингис Кадиркулов, PhD, э.ғ.к., С.Нұрмағамбетов атындағы Құрлық әскерлерінің Әскери институты, Алматы, Қазақстан, kshk777@mail.ru

Алмат Раскалиев, PhD, ғылыми жетекшісі, Ғарыштық техника және технологиялар институты ЕЖШС, Алматы, Қазақстан, raskaliyev@mail.ru

Шамсигүл Кобдикова, т.ғ.д., бөлім меңгерушісі, Қазақстан Республикасы Ұлттық ғылым академиясы, Алматы, Қазақстан, shkobdikova@gmail.com

Анатолий Самсоненко, бас инженер, Ғарыштық техника және технологиялар институты ЕЖШС, Алматы, Қазақстан, Anatolly.sam@yandex.kz

ӘУЕ ОБЪЕКТІСІНЕН ШАҒЫЛЫҒАН GNSS РАДИОСИГНАЛЫНЫҢ ЭНЕРГИЯСЫН БАҒАЛАУҒА АРНАЛҒАН ЕСЕПТІК СҰХБАЛАР

Аннотация. Бұл мақала ауа объектісінен шағылысқан және GNSS радиосигналының навигациялық қабылдағышының антеннасында қабылданған GNSS радиосигналының энергиясын бағалаудың есептеу схемасын жасауға, ауа объектісінің координаталарын анықтауға арналған. Әуе объектісінен шағылысқан және GNSS радиосигналдарының навигациялық қабылдағышының антеннасында қабылданған. GNSS спутниктерін пайдалану негізінде бистатикалық орналасуды пайдаланатын әуе объектілерінің радары мәселесін шешу үшін әуе объектісінен шағылысқан спутниктік навигациялық сигналдың энергетикалық немесе энергетикалық потенциалын бағалау қажет болды, содан кейін ол қабылдау антеннасына келеді. тұтынушыға арналған навигациялық жабдық. Әзірленген есептеу схемалары түрінде ұсынылған нәтижелер пассивті радиолокация жүйесінің алгоритмдік және бағдарламалық жасақтамасының негізін құрайды және оны техникалық қамтамасыз етуге қойылатын талаптарды анықтауға мүмкіндік береді, ҚР БҒМ № АР09260581 гранттық жобасы шеңберінде өткізілген.

Түйінді сөздер. GNSS, тиімді шашырау аймағы, спутниктік радионавигациялық жүйе, радиолокациялық жүйе, жердегі қабылдағыш.

Nurlan Boguspaev, director, Almaty Institute of Technology LLP, Almaty, Kazakhstan, nurlanbsv@mail.ru

Shingis Kadirkulov, PhD, military candidate of science, S. Nurmagambetov Military Institute of ground forces, Almaty, Kazakhstan, kshk777@mail.ru

Almat Raskaliyev, PhD, scientific supervisor, ALLP Institute of Space Engineering and Technology, Almaty, Kazakhstan, raskaliyev@mail.ru

Shamsigul Kobdikova, doctor of technical sciences, head of the department, National Academy of Science Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan, shkobdikova@gmail.com

Anatoly Samsonenko, chief engineer, SLLP Institute of Space Engineering and Technology, Almaty, Kazakhstan, Anatolly.sam@yandex.kz

COMPUTATIONAL SCHEMES FOR ESTIMATION OF THE ENERGY OF THE REFLECTED GNSS RADIO SIGNAL FROM AIR OBJECT

Abstract. This article, the process of a computational scheme for estimating the energy of a GNSS radio signal reflected from an aerial object and received on the antenna of a navigation receiver is developed. In order to successfully implement the task of radar of aerial objects using bistatic location of aerial objects using the GNSS satellite navigation system, it is necessary to pre-evaluate the power or energy potential of the satellite navigation signal reflected from the aerial object, and then received on the antennas of the satellite equipment of consumers. The results obtained, presented in the form of developed computational schemes, will form the basis of the algorithmic and software of the passive radar system and will allow determining the requirements for its technical support carried out within the framework of the grant project of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan No. AP09260581.

Keywords. GNSS, effective scattering area, satellite radio navigation system, radar system, ground receiver.
