

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.12.13>

УДК: 621.396.969.1

О ВЛИЯНИИ РЕФРАКЦИИ НА ОЦЕНКУ УГЛА МЕСТА ЦЕЛИ В БОРТОВОЙ РЛС

С.Н. Киреев

Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь»
623409, Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8

Статья поступила в редакцию 20 октября 2022 г.

Аннотация. Рассматривается влияние рефракции при наблюдении надводной или наземной цели в бортовой РЛС. При этом необходимо учитывать угол фотограмметрической атмосферной рефракции, поведение которого не рассмотрено в литературе по радиолокации. При большой высоте полета РЛС он в несколько раз меньше угла истинной атмосферной рефракции, который актуален для наземных РЛС. Выполнен расчет и сравнение углов рефракции. Рассмотрена упрощенная модель учета рефракции с заменой радиуса Земли на эквивалентный радиус. Оценены допустимые условия ее применения в бортовой РЛС. Представлены таблицы значений угла фотограмметрической рефракции, позволяющие выполнить коррекцию пеленга цели в бортовой РЛС.

Ключевые слова: рефракция, бортовая РЛС, угол фотограмметрической атмосферной рефракции, эквивалентный радиус Земли, систематическая погрешность.

Автор для переписки: Киреев Сергей Николаевич, ksn28m@mail.ru

Введение

При обнаружении цели в наземной или надводной (корабельной) РЛС (НРЛС) выполняется ее наблюдение «снизу вверх». При этом пеленг цели по углу места смещается на угол истинной атмосферной рефракции (УИАР) [1]. Для «стандартной» атмосферы он положительный и может составлять несколько десятых долей градуса [1,2,3]. УИАР создает систематическую погрешность пеленгации по углу места, а также увеличивает дальность радиогоризонта, что учитывается при обработке данных в НРЛС.

При обнаружении наземной или надводной цели в бортовой РЛС (БРЛС) выполняется наблюдение «сверху вниз». При этом пеленг цели по углу места смещается на угол фотограмметрической атмосферной рефракции (УФАР) [1]. Поскольку коэффициент преломления атмосферы обычно снижается с ростом высоты, значение УФАР в несколько раз меньше, чем УИАР. Это необходимо учитывать при обработке данных в БРЛС.

Анализ литературы показал, что в монографиях и справочниках по радиолокации обычно описывается только поведение УИАР, при этом УФАР даже не упоминается. В монографии [1] приведены формулы для расчета обоих углов, однако результаты расчета приводятся только для УИАР. Автору не удалось обнаружить в доступной литературе по радиолокации таблиц или графиков, описывающих поведение УФАР, а также методик учета его поведения при обработке данных в БРЛС.

Таким образом, анализ поведения УФАР и разработка методик коррекции пеленга цели с учетом УФАР в БРЛС является актуальной задачей.

В работе выполнено сравнение поведения УИАР и УФАР для всех значений высоты полета БРЛС в пределах тропосферы (от 0 до 30 км), и для актуальных значений углов наблюдения надводных и наземных целей. Рассмотрена упрощенная модель учета рефракции, основанная на замене радиуса Земли ее эквивалентным радиусом [3]. Оценены допустимые условия применения данной модели в БРЛС. Представлены таблицы значений угла фотограмметрической рефракции для выполнения коррекции пеленга цели.

1. Основные определения

При описании влияния рефракции на работу НРЛС удобно использовать видимый угол места цели и его зависимость от высоты точки на траектории движения электромагнитной волны, в [3] он обозначен θ . Для БРЛС видимый угол места определяется по-другому, поэтому здесь вместо него используется видимый зенитный угол [1], который отсчитывается от местной вертикали. В данной статье используются основные обозначения из [1].

На рис. 1 представлены геометрические соотношения, поясняющие определение углов атмосферной рефракции. Здесь точка O – центр Земли, дуга A_0A_C описывает морскую поверхность, $a = 6371$ км – радиус Земли.

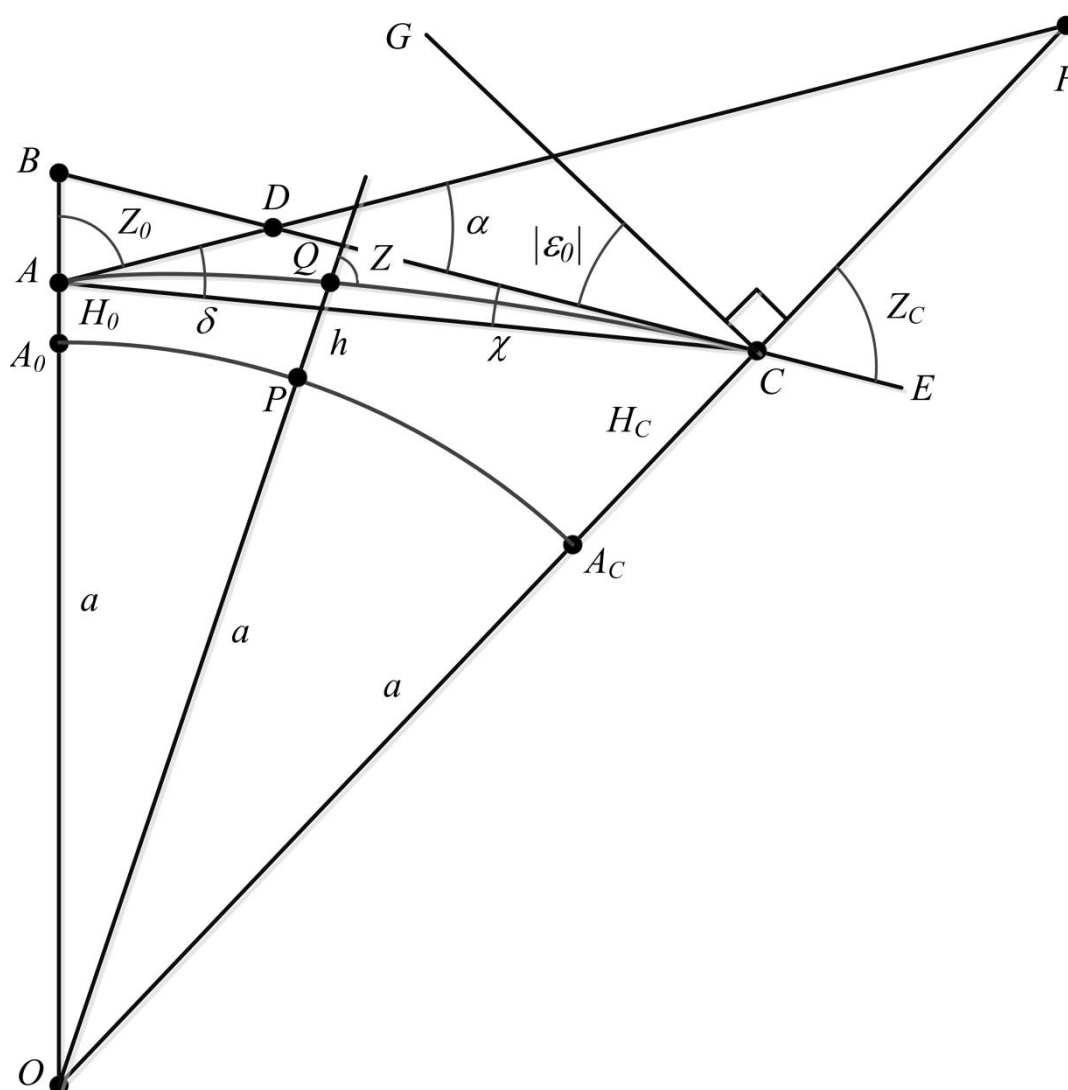


Рис. 1. Геометрические соотношения для расчета углов рефракции

При наблюдении воздушной цели в точке A находится НРЛС, в точке C – цель. При наблюдении надводной или наземной цели с помощью БРЛС в точке A находится цель, в точке C – БРЛС. Высота точки A над морской поверхностью равна H_0 . Высота точки C над морской поверхностью равна $H_C > H_0$. Отрезок прямой AC – истинная линия визирования цели.

Из-за рефракции электромагнитная волна распространяется по дуге AC . Касательная к дуге в точке A обозначена AF . Угол $\angle CAF = \delta$ называется УИАР, он определяет смещение пеленга для НРЛС (в [3] он обозначен ε и назван погрешностью по углу места). Касательная к дуге в точке C обозначена BE . Угол $\angle ACB = \chi$ называется УФАР, он определяет смещение пеленга для БРЛС (в [3] на рис. 1, главы 6 он обозначен δ , но никак не назван и не определен). Поскольку показатель преломления атмосферы убывает с ростом высоты, дуга AC имеет переменный радиус кривизны, и угол $\chi < \delta$. Угол полной атмосферной рефракции (УПАР) равен их сумме

$$\alpha = \angle CDF = \delta + \chi. \quad (1)$$

Он характеризует искривление траектории распространения электромагнитной волны на участке от цели до РЛС. В [3] он обозначен τ .

Высоту некоторой точки Q на дуге AC над уровнем моря обозначим $h = PQ$. Длина радиус-вектора для этой точки $r = OQ = a + h$.

Видимым зенитным углом (ВЗУ) Z в точке Q называется угол между касательной к дуге AC в точке Q и местной вертикалью OQ . В точке C он равен $Z_C = \angle ECF$. Начальный ВЗУ определен для точки A и равен $Z_0 = \angle BAF$. Видимый угол места θ из [3] представляет собой угол между касательной и горизонтальной плоскостью, он связан с ВЗУ соотношением

$$\theta = 90^\circ - Z. \quad (2)$$

Показатель преломления тропосферы в соответствии с экспоненциальной моделью [1, 3] убывает с ростом высоты по закону

$$n = 1 + \Delta_{n0} \cdot e^{-c_e \cdot h}, \quad (3)$$

где $\Delta_{n0} = N_S \cdot 10^{-6}$ – приращение показателя преломления у поверхности моря,
 N_S – индекс рефракции у поверхности моря [3],
 c_e – коэффициент, характеризующий скорость убывания показателя преломления [3].

2. Методы расчета углов атмосферной рефракции

При длине волны $\lambda \leq 5$ см УПАР рассчитывается по формуле (5.14) из монографии [1], которая имеет вид

$$\alpha = - \int_{H_0}^{H_C} \frac{1}{n} \left(\frac{dn}{dh} \right) \operatorname{tg} Z \cdot dh. \quad (4)$$

Выражение совпадает с формулой (4) главы 6 из [3], если заменить $\operatorname{ctg} \theta$ на $\operatorname{tg} Z$, и перейти к интегрированию по высоте. Производная показателя преломления (3) по высоте рассчитывается по формуле

$$\frac{dn}{dh} = -c_e \Delta_{n0} e^{-c_e h}. \quad (5)$$

Для расчета ВЗУ используем уравнение траектории луча (2.37) из [1] (в [3] оно записано для видимого угла места θ), которое имеет вид

$$n(a+h) \sin Z = n_0(a+H_0) \sin Z_0, \quad (6)$$

где $n_0 = n(H_0) = 1 + \Delta_{n0} \cdot e^{-c_e H_0}$ - начальное значение показателя (3).

Его решение для ВЗУ в точке траектории Q с высотой h имеет вид

$$Z = \arcsin \frac{(a+H_0) \cdot n_0 \cdot \sin Z_0}{(a+h) \cdot n}. \quad (7)$$

Расчет УИАР можно выполнить по формуле, приведенной в [3] на с. 224, которая с учетом принятых обозначений имеет вид

$$\delta = \operatorname{arctg} \frac{\cos \alpha - \sin \alpha \operatorname{ctg} Z - n/n_0}{n/n_0 \operatorname{ctg} Z - \sin \alpha - \cos \alpha \operatorname{ctg} Z}. \quad (8)$$

Расчет УФАР с учетом (1) можно выполнить по формуле

$$\chi = \alpha - \delta. \quad (9)$$

При ВЗУ $Z_0 \leq 88^\circ$ значения УФАР и УИАР можно рассчитать по формулам (5.13) и (5.15) из монографии [1], которые имеют вид

$$\chi = - \int_{H_0}^{H_C} \frac{1}{n} \left(\frac{dn}{dh} \right) \operatorname{tg} Z \frac{h}{H_C} dh. \quad (10)$$

$$\delta = - \int_{H_0}^{H_C} \frac{1}{n} \left(\frac{dn}{dh} \right) \operatorname{tg} Z \left(1 - \frac{h}{H_C} \right) dh. \quad (11)$$

Отметим, что влияние рефракции на пеленгацию цели максимально при значениях ВЗУ близких к 90° , поэтому расчет по формулам (10) и (11) не является актуальным и используется только для сравнения. В монографии [1] в таблицах П1-П3 приводятся результаты расчета УИАР δ для значений ВЗУ от 0 до 90° , однако методика расчета при больших значениях ВЗУ не описана. Непосредственное использование приведенных результатов расчета также затруднено, поскольку они получены для авторской биэкспоненциальной модели атмосферы [1].

3. Результаты расчета

Выполнен расчет УПАР α по формуле (4). Значения коэффициентов заданы для «стандартной» атмосферы из [3]: $N_S = 313$; $c_e = 0,143859$ [1/км]. Для оценки максимальных значений углов рефракции задана высота $H_0 = 0$ и начальный ВЗУ $Z_0 = 90^\circ$ (при этом угол места $\theta = 0^\circ$). Значения УИАР δ рассчитаны по формуле (8), значения УФАР χ – по формуле (9). На рис. 2 приведены графики зависимости всех углов атмосферной рефракции от высоты H_C .

При большой высоте H_C значение УИАР δ в 2 раза и более превышает значение УФАР χ , их разность достигает $0,35^\circ$. Это означает, что учет влияния рефракции в НРЛС и в БРЛС необходимо выполнять разными методами.

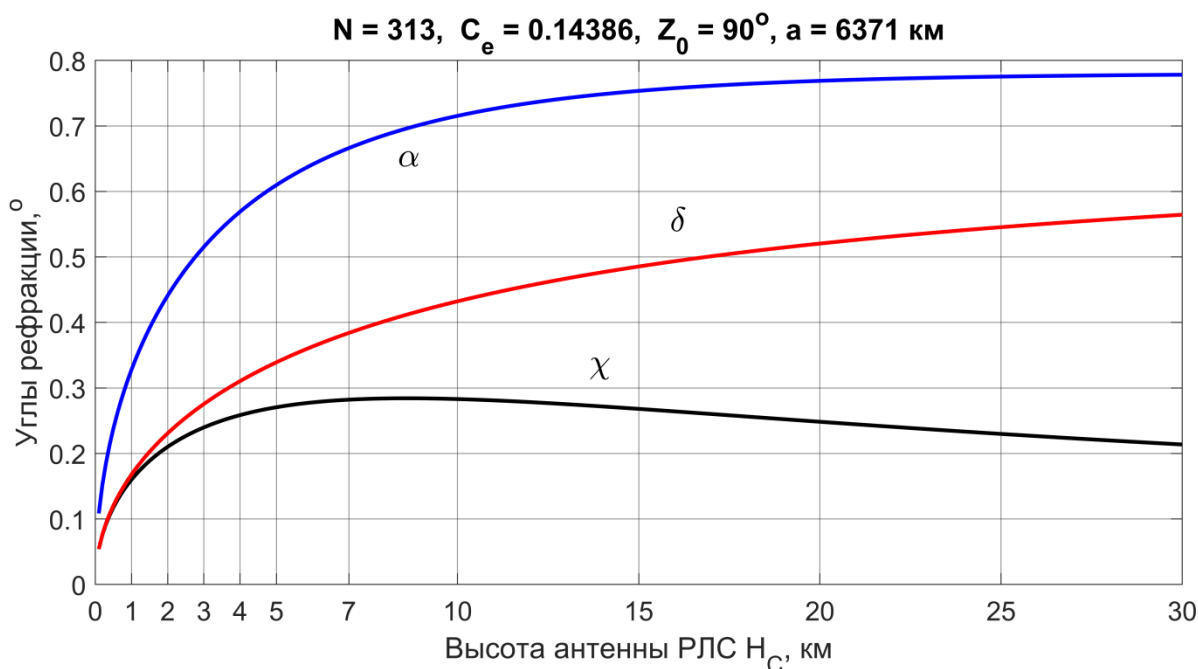


Рис. 2. Зависимость углов атмосферной рефракции от высоты H_C

При малой высоте значение УПАР α снижается, а значения УИАР и УФАР сближаются и равны $\chi \approx \delta \approx \alpha/2$, что соответствует данным [1].

На рис. 3 приведены графики зависимости углов атмосферной рефракции от начального значения ВЗУ при высоте $H_C = 15 \text{ км}$. При $Z_0 < 80^\circ$ значение УФАР $\chi < 0,03^\circ$, и им можно пренебрегать.

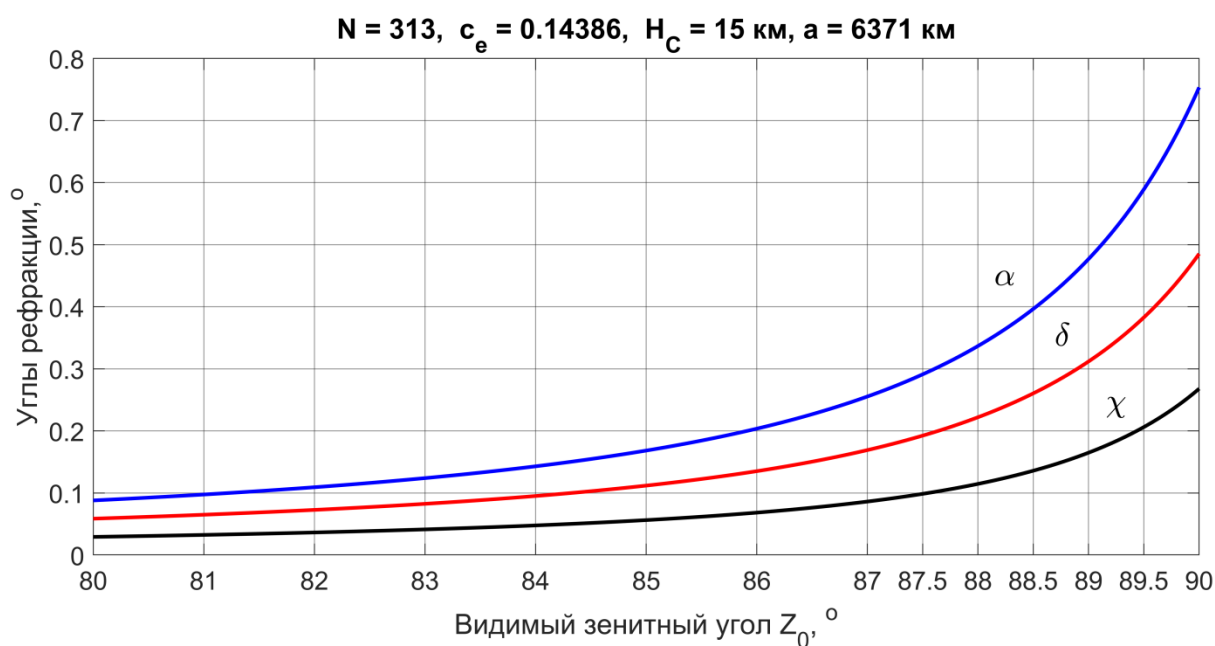


Рис. 3. Зависимость углов рефракции от начального значения ВЗУ

Выполнено сравнение поведения графика для УПАР α на рис. 2 с графиком на рис. 5 главы 6 из [3]. Полученные значения УПАР на 10% ниже, чем в [3]. Причину расхождений определить не удалось. Возможно, она связана с погрешностями численного интегрирования по формуле (4) в окрестности сингулярности подынтегрального выражения: при $Z \rightarrow 90^\circ$ $\operatorname{tg} Z \rightarrow \infty$. При интегрировании по формуле (4) использованы адаптивные алгоритмы и расчеты с двойной точностью. Отметим, что при искусственном увеличении УПАР α на 10 % значения УИАР δ пропорционально возрастают, при этом значения УФАР χ остаются без существенных изменений. Поэтому результатам расчета УФАР можно доверять.

Для сравнения выполнены расчеты углов рефракции по формулам (10), (11) и (1) для «стандартной» атмосферы. На рис. 4 приведены графики зависимости углов атмосферной рефракции от начального значения ВЗУ при высоте $H_C = 15$ км. Значения ВЗУ $Z_0 \leq 88^\circ$, что соответствует ограничениям из [1].

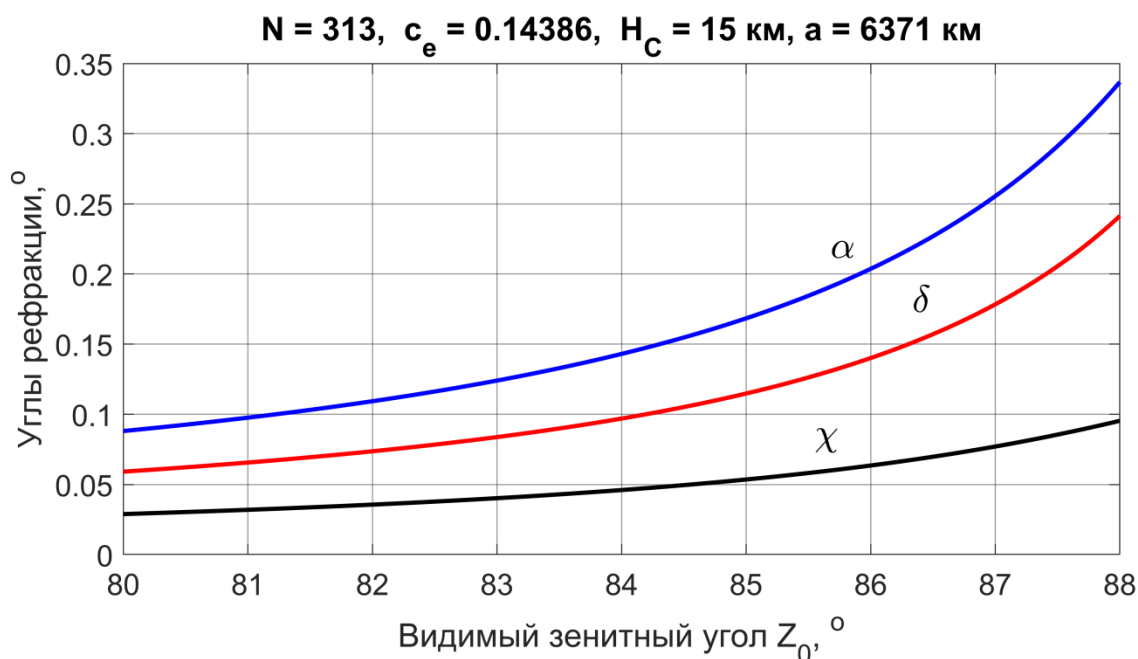


Рис. 4. Зависимость углов рефракции от начального значения ВЗУ

Сравнение с графиками на рис. 3 дает удовлетворительное совпадение результатов. При расчете по методике из [1] значения УФАР меньше, при этом различия не превышают $0,02^\circ$.

На рис. 5 приведены графики зависимости УФАР χ от высоты H_C , рассчитанные по формулам (4), (8) и (9) при $Z_0 = 90^\circ$ для разных состояний атмосферы, определенных по данным [3].

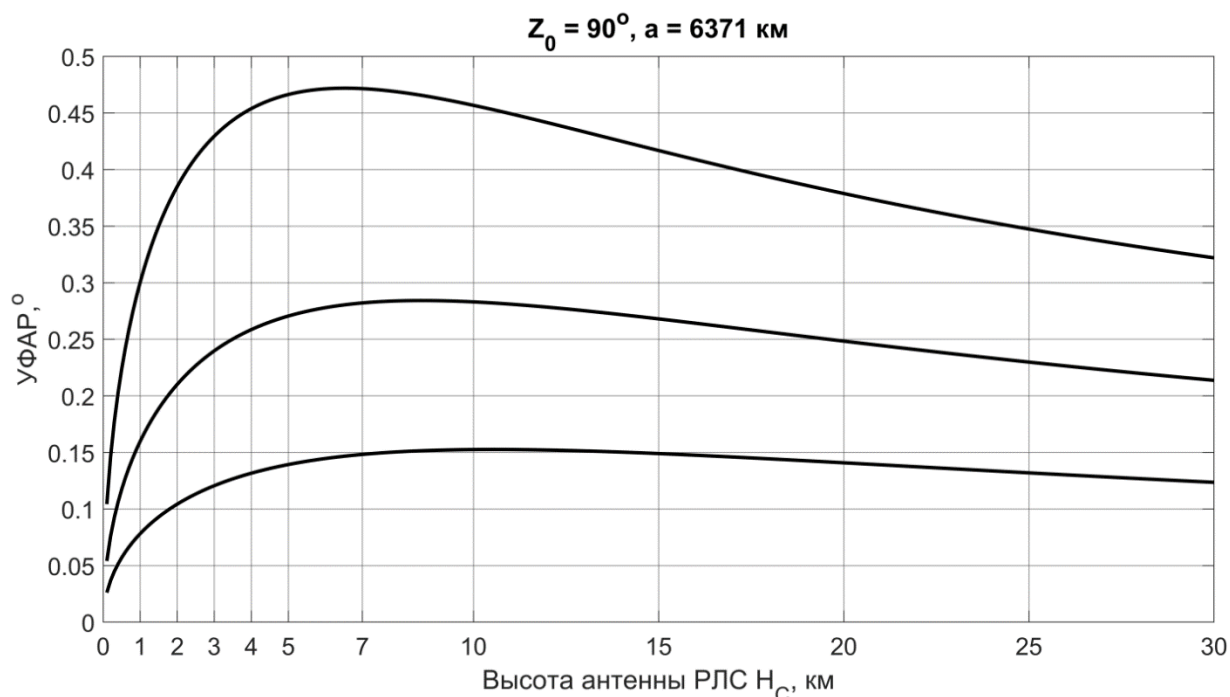


Рис. 5. Зависимость УФАР от высоты H_C для разных состояний атмосферы

Нижний график рассчитан для атмосферы с низкой влажностью при $N_S = 200$; $c_e = 0,118400$ [1/км]. Средний график рассчитан для «стандартной» атмосферы при $N_S = 313$; $c_e = 0,143859$ [1/км]. Верхний график рассчитан для атмосферы с высокой влажностью при $N_S = 400$; $c_e = 0,186720$ [1/км].

В зависимости от состояния атмосферы значения УФАР могут меняться в пределах $\pm 0,15^\circ$. Это определяет амплитуду случайных погрешностей пеленгации цели в БРЛС, связанных с отсутствием данных о погодных условиях.

4. Об упрощенном методе учета рефракции

Разработчики РЛС часто используют упрощенный метод учета влияния рефракции [3] с заменой радиуса Земли a на эквивалентный радиус Земли $a_e = 8500$ км. Необходимо иметь в виду, что такая модель учета рефракции адекватно работает для НРЛС при высоте полета цели не более 1 км. При высоте

цели от 1 до 15 км данная модель до 1,5 раз занижает значение УПАР, а при высоте более 15 км – завышает его [3].

Для БРЛС вместо УИАР δ необходимо использовать УФАР χ . При малых высотах БРЛС и цели $\chi \approx \delta$, поэтому данная модель также адекватна при $H_C < 1$ км. С ростом высоты упрощенная модель занижает значение УПАР α , но она может оказаться адекватной для БРЛС, поскольку $\chi < \delta$. Необходимо оценить пределы адекватности данной модели в зависимости от высоты полета БРЛС. На рис. 6 показаны геометрические соотношения для оценки χ .

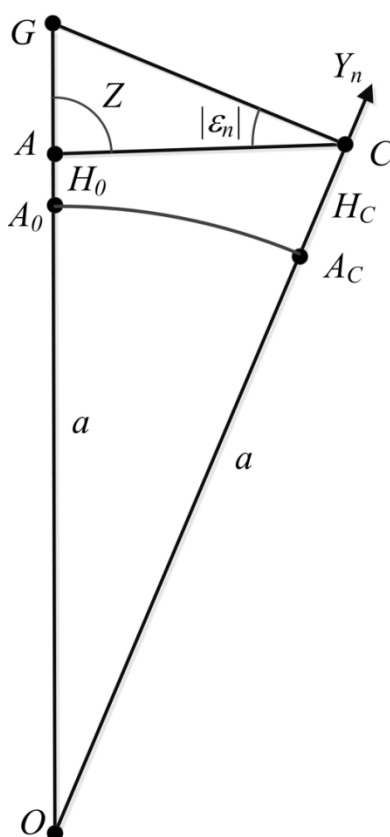


Рис. 6. Геометрические соотношения для упрощенного метода

БРЛС находится в точке C , вертикальная ось ее нормальной системы координат (НСК) по ГОСТ 20058 обозначена OY_n . Линия CG перпендикулярна OC , поэтому CG лежит в горизонтальной плоскости НСК. Цель находится в точке A , при этом $|\epsilon_n| = \angle ACG$ представляет собой угол места цели в НСК. Остальные обозначения совпадают с рис. 1. В зависимости от заданных условий с помощью рис. 6 можно моделировать две ситуации:

1) В упрощенной модели задается эквивалентный радиус Земли: $a = a_e$. При этом предполагается, что траектория распространения электромагнитной волны становится прямолинейной [3] – это отрезок прямой AC . Тогда $Z = Z_0$ – начальное значение ВЗУ, $\varepsilon_n = \varepsilon_0$ – видимый угол места в НСК (не следует путать его с видимым углом места θ , определенным в [3] для НРЛС);

2) Зададим радиус Земли $a = 6371$ км. Тогда отрезок прямой AC представляет собой истинную линию визирования цели, $Z = Z_0 + \delta$ – истинное значение зенитного угла, $\varepsilon_n = \varepsilon$ – истинное значение угла места цели в НСК.

Теперь значение УФАР можно рассчитать по формуле

$$\chi = \varepsilon_0 - \varepsilon. \quad (12)$$

При этом $\chi > 0$, поскольку $\varepsilon < \varepsilon_0 < 0$. Для расчета значений угла места запишем уравнение по теореме синусов для треугольника ACO :

$$\frac{\sin C}{AO} = \frac{\sin A}{CO}.$$

Учтем, что $\angle C = 90^\circ - |\varepsilon_n|$, $\angle A = 180^\circ - Z$, $AO = a + H_0$, $CO = a + H_C$. При $\varepsilon_n < 0$ решение уравнения относительно угла места имеет вид

$$\varepsilon_n = \arcsin\left(\frac{(a + H_0)\sin Z}{a + H_C}\right) - 90^\circ. \quad (13)$$

Подставляя соответствующие значения a и Z , можно рассчитать ε и ε_0 .

Выполнен расчет значений УФАР по формулам (12) и (13) для высоты $H_0 = 0$ и начального ВЗУ $Z_0 = 90^\circ$. Значения УИАР δ рассчитывались по формуле (8) для «стандартной» атмосферы. На рис. 7 приведен график зависимости оценки УФАР для упрощенной модели от высоты.

Сравнение с нижним графиком на рис. 2 показывает, что погрешности работы упрощенной модели можно считать удовлетворительными при высоте БРЛС H_C менее 4 км. При этом погрешность оценки УФАР будет менее $0,03^\circ$. При увеличении высоты погрешности модели растут и могут достигать $0,55^\circ$.

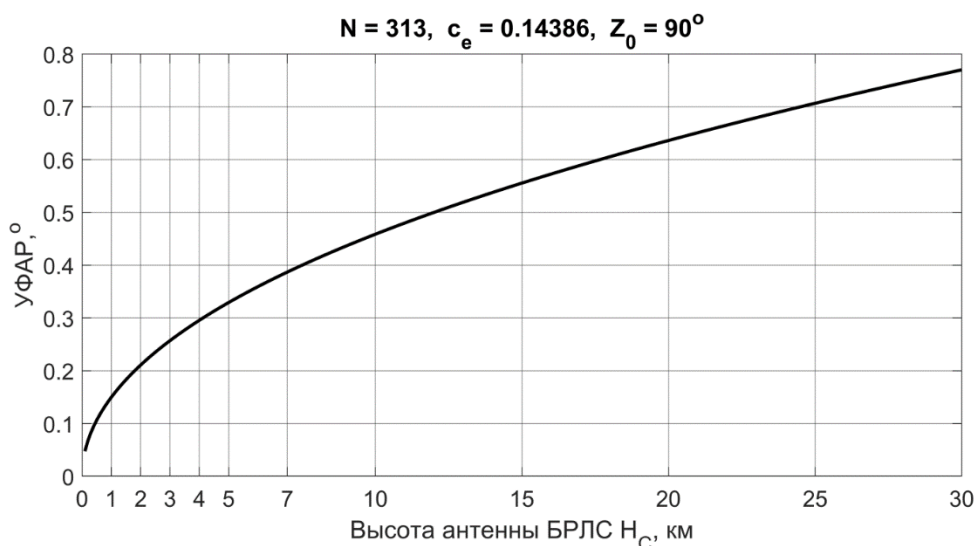


Рис. 7. Зависимость УФАР для упрощенной модели от высоты при $Z_0 = 90^\circ$

5. Коррекция угла места цели для БРЛС с учетом значения УФАР

Значение УФАР для «стандартной» атмосферы определяет систематическую погрешность пеленгации цели в БРЛС. В соответствии с рис. 3 при $Z_0 = 90^\circ$ она может достигать $0,25^\circ$, но быстро убывает при уменьшении ВЗУ. Для больших значений погрешности необходимо выполнить коррекцию. Ее можно выполнить по таблице значений УФАР для актуальных значений ВЗУ Z_0 и высоты полета БРЛС H_C . Однако в БРЛС известен только пеленг цели по углу места (видимое значение угла места ε_0), но неизвестно значение ВЗУ.

Для вывода расчетной формулы для ВЗУ на рис. 1 проведем линию CG перпендикулярно OC . Тогда $|\varepsilon_0| = \angle BCG$ представляет собой модуль видимого угла места цели в НСК. При $\varepsilon_0 < 0$ ВЗУ в точке C равен

$$Z_C = 180^\circ - 90^\circ - |\varepsilon_0| = 90^\circ + \varepsilon_0.$$

Подставим его в качестве значения Z в уравнение траектории луча (6) и решим его относительно начального значения ВЗУ, получим

$$Z_0 = \arcsin \frac{n_C(a + H_C) \cos \varepsilon_0}{n_0(a + H_0)}, \quad (14)$$

где $n_C = n(H_C) = 1 + \Delta_{n0} \cdot e^{-c_e \cdot H_C}$ - значение показателя (3) в точке C .

Формула (14) позволяет рассчитать значение ВЗУ Z_0 по заданному значению видимого угла места ε_0 . При этом должна быть известна высота цели

над морской поверхностью H_0 . Для надводной цели она равна высоте корпуса цели над морской поверхностью и может составлять несколько единиц или десятков метров. При отсутствии априорных данных ее можно задать равной нулю. Для наземной цели она определяется высотой подстилающей земной поверхности над уровнем моря и может достигать нескольких километров. Если нет априорных данных о высоте поверхности, приблизительное значение H_0 можно рассчитать с учетом измеренной дальности цели и видимого значения угла места ε_0 по известным формулам.

В таблице 1 приведены результаты расчета значений УФАР при $H_0 = 0$ для выполнения коррекции пеленга надводной цели. Поскольку шаг его значений достаточно мал, для аппроксимации можно использовать простейший метод ближайшего соседа. Погрешность аппроксимации не превысит $0,025^\circ$.

Таблица 1. Значения УФАР χ , $^\circ$, для высоты цели $H_0 = 0$

H_C , км	Начальное значение ВЗУ, $^\circ$										
	80.0	85.0	87.0	88.0	88.5	89.0	89.4	89.6	89.8	89.9	90.0
0.1	0.001	0.001	0.002	0.004	0.005	0.007	0.012	0.017	0.027	0.038	0.054
0.2	0.001	0.003	0.005	0.007	0.010	0.014	0.022	0.030	0.046	0.059	0.076
0.5	0.003	0.007	0.012	0.017	0.023	0.032	0.049	0.063	0.084	0.099	0.117
1.0	0.007	0.013	0.022	0.032	0.042	0.058	0.082	0.100	0.126	0.142	0.160
1.2	0.008	0.016	0.026	0.038	0.048	0.067	0.093	0.112	0.138	0.154	0.173
1.5	0.009	0.019	0.031	0.045	0.058	0.079	0.107	0.128	0.154	0.170	0.189
2.0	0.012	0.024	0.039	0.056	0.071	0.096	0.127	0.148	0.176	0.192	0.210
2.2	0.013	0.026	0.042	0.060	0.076	0.102	0.133	0.155	0.183	0.199	0.217
2.5	0.014	0.029	0.046	0.066	0.083	0.110	0.142	0.165	0.192	0.209	0.227
3.0	0.016	0.033	0.053	0.075	0.093	0.121	0.155	0.178	0.206	0.222	0.240
3.3	0.018	0.035	0.056	0.079	0.098	0.127	0.162	0.185	0.212	0.229	0.246
4.0	0.020	0.039	0.063	0.088	0.109	0.139	0.174	0.197	0.225	0.241	0.259
5.0	0.023	0.045	0.071	0.098	0.120	0.152	0.187	0.210	0.238	0.253	0.271
8.0	0.028	0.054	0.085	0.114	0.137	0.169	0.204	0.227	0.253	0.268	0.284
15.0	0.029	0.056	0.086	0.115	0.136	0.165	0.197	0.217	0.240	0.253	0.268
20.0	0.027	0.052	0.080	0.106	0.125	0.152	0.182	0.200	0.222	0.235	0.248
25.0	0.024	0.047	0.072	0.096	0.114	0.140	0.167	0.185	0.205	0.217	0.230
30.0	0.022	0.042	0.065	0.088	0.105	0.128	0.154	0.171	0.190	0.202	0.214

В таблицах 2-4 приведены аналогичные результаты расчета для нескольких значений высоты наземной цели. Во всех случаях выполняется условие $H_C > H_0$, поэтому используется УФАР. Аппроксимацию по высоте

цели можно выполнить по значениям УФАР из таблиц 1-4 при равных значениях высоты H_C и ВЗУ Z_0 . При линейной аппроксимации общая погрешность не превысит $0,03^\circ$. Для отсутствующих в таблицах 2-4 значений высоты следует брать нулевые значения УФАР.

Таблица 2. Значения УФАР χ , $^\circ$, для высоты цели $H_0 = 0,99$ км

H_C , км	Начальное значение ВЗУ, $^\circ$										
	80.0	85.0	87.0	88.0	88.5	89.0	89.4	89.6	89.8	89.9	90.0
1.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.003	0.005	0.015
1.2	0.001	0.003	0.004	0.007	0.009	0.013	0.020	0.027	0.041	0.051	0.066
1.5	0.003	0.006	0.010	0.015	0.020	0.029	0.042	0.054	0.073	0.085	0.100
2.0	0.006	0.012	0.019	0.028	0.036	0.050	0.071	0.086	0.108	0.121	0.136
2.2	0.007	0.014	0.022	0.033	0.042	0.058	0.080	0.096	0.118	0.131	0.146
2.5	0.008	0.017	0.027	0.039	0.050	0.068	0.092	0.109	0.132	0.145	0.160
3.0	0.010	0.021	0.034	0.049	0.062	0.082	0.109	0.127	0.150	0.163	0.178
3.3	0.012	0.023	0.038	0.054	0.068	0.090	0.117	0.136	0.159	0.172	0.187
4.0	0.014	0.028	0.046	0.065	0.080	0.104	0.133	0.152	0.175	0.188	0.203
5.0	0.017	0.034	0.055	0.076	0.094	0.120	0.149	0.169	0.192	0.205	0.219
8.0	0.023	0.045	0.070	0.096	0.115	0.142	0.172	0.191	0.213	0.226	0.239
15.0	0.026	0.049	0.075	0.100	0.118	0.143	0.170	0.187	0.207	0.218	0.230
20.0	0.024	0.046	0.070	0.093	0.110	0.133	0.158	0.174	0.192	0.202	0.214
25.0	0.022	0.041	0.063	0.085	0.100	0.122	0.145	0.160	0.177	0.187	0.198
30.0	0.019	0.037	0.057	0.077	0.092	0.112	0.134	0.148	0.164	0.173	0.184

Таблица 3. Значения УФАР χ , $^\circ$, для высоты цели $H_0 = 1,99$ км

H_C , км	Начальное значение ВЗУ, $^\circ$										
	80.0	85.0	87.0	88.0	88.5	89.0	89.4	89.6	89.8	89.9	90.0
2.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.001	0.003	0.005	0.012
2.2	0.001	0.002	0.004	0.006	0.007	0.011	0.017	0.023	0.035	0.044	0.056
2.5	0.003	0.005	0.009	0.013	0.017	0.025	0.037	0.047	0.062	0.072	0.085
3.0	0.005	0.010	0.017	0.024	0.031	0.043	0.061	0.074	0.092	0.103	0.115
3.3	0.006	0.013	0.021	0.030	0.039	0.053	0.072	0.086	0.105	0.116	0.128
4.0	0.009	0.018	0.029	0.042	0.053	0.071	0.093	0.108	0.128	0.139	0.151
5.0	0.012	0.025	0.040	0.056	0.069	0.090	0.114	0.130	0.149	0.160	0.173
8.0	0.019	0.037	0.058	0.079	0.095	0.118	0.143	0.159	0.178	0.189	0.200
15.0	0.022	0.043	0.066	0.087	0.103	0.124	0.148	0.162	0.179	0.188	0.198
20.0	0.021	0.04	0.061	0.081	0.096	0.116	0.137	0.151	0.166	0.175	0.185
25.0	0.019	0.037	0.056	0.074	0.088	0.106	0.126	0.139	0.153	0.162	0.171
30.0	0.017	0.033	0.051	0.067	0.080	0.097	0.116	0.128	0.142	0.15	0.158

Таблица 4. Значения УФАР χ , °, для высоты цели $H_0 = 2,99$ км

H_C , км	Начальное значение ВЗУ, °										
	80.0	85.0	87.0	88.0	88.5	89.0	89.4	89.6	89.8	89.9	90.0
3.0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.004	0.010
3.3	0.001	0.003	0.005	0.007	0.009	0.014	0.021	0.028	0.039	0.047	0.057
4.0	0.004	0.009	0.014	0.021	0.027	0.037	0.052	0.063	0.078	0.087	0.098
5.0	0.008	0.016	0.025	0.037	0.046	0.061	0.080	0.093	0.109	0.118	0.129
8.0	0.015	0.029	0.046	0.063	0.077	0.096	0.117	0.131	0.147	0.156	0.166
15.0	0.019	0.037	0.057	0.075	0.089	0.108	0.128	0.140	0.154	0.162	0.171
20.0	0.019	0.036	0.054	0.071	0.084	0.101	0.120	0.131	0.144	0.152	0.160
25.0	0.017	0.032	0.049	0.065	0.077	0.093	0.110	0.121	0.133	0.140	0.148
30.0	0.015	0.029	0.044	0.059	0.070	0.085	0.101	0.111	0.123	0.129	0.137

Заключение

Выполнен расчет и сравнение углов атмосферной рефракции. При большой высоте БРЛС значения УИАР в 2 раза и более превышают значения УФАР, разность их значений может достигать $0,35^\circ$. Это означает, что учет влияния рефракции в НРЛС и в БРЛС необходимо выполнять разными методами.

При больших значениях высоты и ВЗУ для «стандартной» атмосферы значения УФАР могут достигать $0,25^\circ$. Для больших значений УФАР необходимо выполнять компенсацию систематической погрешности пеленгации цели в БРЛС по углу места. Случайные погрешности пеленгации цели в БРЛС, связанные с неопределенностью состояния атмосферы, могут достигать $\pm 0,15^\circ$.

Выполнен анализ адекватности использования в БРЛС упрощенной модели учета рефракции с заменой радиуса Земли на эквивалентный радиус. Данная модель адекватна для БРЛС при высоте ее полета не выше 4 км. При этом погрешность коррекции угла места цели не превышает $0,03^\circ$. При росте высоты погрешности модели быстро растут и могут достигать $0,55^\circ$. Известно [3], что для НРЛС данная модель адекватна при высоте полета цели до 1 км.

Представлены таблицы значений УФАР, позволяющие выполнить коррекцию пеленга цели в бортовой РЛС. Погрешность аппроксимации УФАР

по таблицам не превышает $0,03^\circ$, что много меньше случайной составляющей погрешности пеленгации цели.

Литература

1. Колосов М.А., Шабельников А.В. *Рефракция электромагнитных волн в атмосферах Земли, Венеры и Марса*. Москва, Советское радио. 1976. 220 с.
2. Берковиц Р.С. *Современная радиолокация (анализ, расчет и проектирование систем)*. Москва, Советское радио. 1969. 704 с.
3. Сколник М.И. *Справочник по радиолокации. Том 1. Основы радиолокации*. Москва, Советское радио. 1976. 456 с.

Для цитирования:

Киреев С.Н. О влиянии рефракции на оценку угла места цели в бортовой РЛС. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2022. №12. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.12.13>